

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**Самохвалов Олег Владимирович**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ОБЖИГА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМЗИТА  
ЗАДАННОЙ ПРОЧНОСТИ**

Специальность: **05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические системы)**

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Научный руководитель:  
д.т.н., профессор Галицков Станислав Яковлевич

Самара 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Введение.....	4
1	Основные задачи автоматического управления вращающимися печами для производства керамзита высокой прочности.....	11
1.1	Технологические требования, предъявляемые к производству высокопрочного керамзита.....	11
1.2	Технологический процесс обжига керамзита.....	26
1.3	Обзор известных систем управления вращающимися печами для обжига керамзита.....	31
1.4	Задачи автоматического управления вращающимися печами для обжига керамзита заданной прочности.....	34
	Выводы по первой главе.....	37
2	Математическое описание технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи как объекта управления.....	39
2.1	Определение объекта управления, управляющие и возмущающие воздействия.....	39
2.2	Математическое описание теплофизических процессов, протекающих во вращающейся печи при обжиге керамзита.....	41
2.3	Математическое описание исполнительных электроприводов технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи.....	50
2.3.1	Математическая модель электропривода ленточного питателя.....	50
2.3.2	Математическая модель асинхронного трёхмассового электропривода вращающейся печи.....	53
2.3.3	Математическая модель электропривода газовой горелки.....	58
2.4	Температурно-прочностные характеристики процесса обжига.....	59
2.5	Технологические ограничения и область существования процесса обжига при получении прочного керамзита.....	64
2.6	Моделирование обжига керамзита в печи с регулируемой скоростью вращения как объекта управления.....	68
	Выводы по второй главе.....	83
3	Многомерная система автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита.....	86

3.1	Требования к многомерной системе автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита.....	86
3.2	Отображение прочностных характеристик керамзита в пространстве температурных режимов трёх опорных сечений печи.....	88
3.3	Структурный синтез многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита.....	92
3.4	Моделирование программной траектории задатчика скорости электропривода вращающейся печи в пусковых и переходных режимах..	99
3.5	Устойчивость многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита.....	108
3.6	Оценка влияния квантования на динамику цифровых систем автоматического управления вращающейся печью, ленточным питателем и газовой горелкой .....	113
	Выводы по третьей главе.....	116
4	Численное моделирование объекта и системы управления.....	118
4.1	Моделирование объекта управления МСАУ ТПОК.....	118
4.2	Моделирование одномассового и трёхмассового исполнительных электроприводов вращающейся печи.....	122
4.3	Определение характера переходных процессов и построение вычислительной модели объекта управления.....	132
4.4	Вычислительная модель МСАУ ТПОК. Параметрическая настройка регуляторов.....	135
4.5	Техническая реализация МСАУ ТПОК.....	152
4.6	Технико-экономический расчёт.....	160
	Выводы по четвёртой главе.....	170
	Заключение.....	172
	Библиографический список.....	175
	Приложение А Методика инженерного проектирования МСАУ ТПОК.....	189
	Приложение Б Акт внедрения в практику инженерного использования...	204
	Приложение В Акты внедрения в учебный процесс.....	206
	Приложение Г Патент на изобретение.....	210

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Керамзит нашёл широкое применение в современном строительстве. Прежде всего, его используют в качестве заполнителя бетонов при возведении зданий и сооружений. В результате снижается вес строительных конструкций и, как следствие, уменьшаются (до 30%) затраты на сооружаемый фундамент здания. Кроме того, уменьшаются теплопотери зданий в окружающую среду, повышается их огнестойкость. В последние годы область применения керамзита значительно расширилась. Он используется при строительстве мостов, в покрытиях аэродромов и автодорог, в судостроении. Как показала практика, это позволяет повысить их прочность, долговечность и морозостойкость [1-3].

Для обеспечения широкого диапазона практического применения керамзита (к примеру, для теплоизолирующих конструкций необходимо использовать керамзит с малой величиной насыпной плотности, а для строительства автодорог, аэродромных покрытий и несущих стен зданий требуется керамзит с большей величиной прочности) его промышленное производство должно осуществляться с заданными физико-механическими характеристиками и, прежде всего, со стабильным значением требуемой прочности [1].

В технологическом процессе производства керамзита, который изготавливается из глин и суглинков, вспучивающихся при обжиге, можно выделить несколько последовательно выполняемых операций – приготовление керамической массы с заданными значениями влажности и температуры, изготовление гранул сырца, их последующую сушку, обжиг (при котором происходит вспучивание керамзита) и охлаждение [1,4,5]. Последовательность фазовых переходов исходного сырья в готовый строительный материал (керамзит) выполняется поэтапно при помощи технологического комплекса производства керамзита. Сначала глина поступает в глиносмеситель, формируется шнековым прессом, обкатывается и сушится в сушильном барабане, далее ленточным питателем подаётся в главный агрегат технологического комплекса –

вращающуюся печь, где под действием дымовых газов от горелки сырец окончательно высушивается, нагревается, вспучивается, частично охлаждается, затем поступает в барабанный холодильник и на склад готовой продукции [1,4,5].

В настоящее время оборудование по производству керамзита оснащается современными средствами и устройствами автоматики [6]. Но они в большинстве своём используются лишь для мониторинга, контроля действий оператора, информирования о внештатных ситуациях и т.д. [7-9], при этом системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита во вращающейся печи в недостаточной мере разработаны и поэтому практически не используются. В связи с этим, управление процессом обжига во вращающихся печах осуществляется «вручную» оператором, что зачастую приводит к сбоям в технологическом процессе, появлению брака (спеканию керамзита в конгломераты, получению керамзита не соответствующей заданному значению марки), что вызывает, как следствие, финансовые издержки предприятия [1]. Кроме того на предприятиях по производству керамзита возникает и другая актуальная задача – переналадка и дополнительная настройка режимов работы вращающейся печи для получения керамзита с требуемыми показателями по насыпной плотности и прочности. При этом предъявляются жёсткие требования по стабильному значению прочности керамзита, снижению брака и уменьшению энергозатрат. В опубликованных работах по синтезу систем автоматического управления вращающимися печами, в частности А.С. Фадеева [6,10], предложено математическое описание и смоделирован этот технологический процесс как объект управления с распределёнными параметрами для производства лёгкого теплоизоляционного керамзита, однако автор в своей работе не рассматривал вопросы влияния регулирования скорости электропривода вращающейся печи на процесс обжига с целью производства высокопрочного конструкционного керамзита. Решению этого вопроса посвящена настоящая работа.

Диссертация выполнена в соответствии с тематическими планами госбюджетных научно-исследовательских работ ФГБОУ ВПО «Самарский государственный архитектурно-строительный университет» «Синтез

интеллектуальных систем автоматического управления технологическими процессами производства бетонных изделий и керамических материалов» (№ 01201255595 госрегистрации от 05.03.2012г.) по направлению «Автоматизированные системы в строительстве» (№ 01970005686 госрегистрации от 23.05.2007г.) и «Структурный синтез интеллектуальных систем автоматического управления технологическими процессами производства керамических материалов и изделий с заданной прочностью и плотностью» (№ 01201459058 госрегистрации от 24.02.2014 г.).

**Степень разработанности темы исследования.** Отечественными основоположниками технологии пористых вспученных строительных материалов из глинистого сырья являются С.П. Онацкий, И.А. Гервидс, П.П. Будников [1].

Значительный научный вклад в развитие керамзитовой промышленности внесли отечественные и зарубежные учёные, в их числе: В.В. Еременко, О.Ю. Якшаров, В.П. Петров, Б.В. Скиба, А.Н. Емельянов, В.Ф. Вебер, В.В. Сыромятников, Б.С. Комисаренко, В.И. Шипулин, Г.М. Бигильдеева, Б.В. Шаль, М.К. Кабанова, В.М. Красавин, В.Я. Ратновский, А.А. Эльконюк, В.М. Горин., С.А. Мизюряев, А.Г. Чикноворьян, А.С. Фадеев, R. Gronman, P. Gorman, T.W. Bremner, T.A. Holm, В.М. Gallaway, В. Martin, J. Ries и многие другие [1,2,5,6,10-19].

Ведущими институтами, изучающими пористые заполнители, являются: отечественный НИИКерамзит [1,2,5,11,14,20] и зарубежный международный ESCSI (Expanded Shale, Clay and Slate Institute). Также в становлении промышленности по производству керамзита и керамзитобетона участвовали ведущие институты, такие как ВНИИСТРОМ им. П.П. Будникова, НИИЖБ, ВНИИСтройкерамика, ВНИИжелезобетон, ГИПРОстром, СГАСУ, ВНИИСтроммаш, ВНИИНеруд, ЦКБ Строммашина, ВНИИСТ [1,6,10,12,13,22].

Над повышением эффективности управления электроприводами технологических установок и вращающихся печей работали Е.И. Ходоров, В.Г. Лисиенко, М.П. Белов, А.Д. Новиков, Л.Н. Рассудов, В.Ф. Казаченко [23-26].

Структурному синтезу систем управления с распределенными параметрами посвящены работы А.Г. Бутковского, Э.Я. Рапопорта Л.М. Пустыльникова [27-32] и др., синтезу систем автоматического управления производством керамзита – С.Я. Галицкова, К.С. Галицкова, А.С. Фадеева [33-41] и др.

**Цель диссертационной работы** – совершенствование технологического процесса обжига керамзита с заданной прочностью путём создания многомерной системы автоматического управления вращающейся печью;

Поставленная цель достигается путем решения следующих *задач*:

– создание математических моделей теплофизических процессов обжига керамзита во вращающейся печи как объектов управления с распределёнными (для уточнённых расчетов) и сосредоточенными (для синтеза многомерной системы автоматического управления) параметрами;

– структурный синтез многомерной системы автоматического управления обжигом керамзита во вращающейся печи обеспечивающей формирование требуемой кривой обжига керамзита, соответствующей заданной прочности, где вектор выходных координат включает в себя значения температуры керамзита в трёх характерных сечениях печи, компонентами вектора управляющих воздействий являются скорость вращения  $\omega_n$ , печи величина загрузки  $q_3$  печи, объёмная тепловая мощность  $Q_r$  горелки; а в качестве основного возмущения рассматривается влажность  $w$  сырца керамзита;

– создание комплекса вычислительных моделей, ориентированных на моделирование процессов в объекте и многомерной системы управления обжигом керамзита, разработку методики численного моделирования технологического процесса обжига керамзита;

– разработка инженерной методики проектирования многомерной системы автоматического управления обжигом керамзита во вращающейся печи и её техническая реализация.

**Методология и методы исследования.** При решении поставленных в диссертационной работе задач использовались методы теории автоматического управления, теории электрического привода, методы идентификации и аппроксимации моделей объектов управления. Численное решение задач осуществлялось на основе методов математического и компьютерного моделирования в программных средах SolidWorks, MATLAB/Simulink, MathCad.

**Достоверность полученных результатов** базируется на фундаментальных положениях теории автоматического управления, теории электрического привода и теории пограничного слоя, обоснованности принятых допущений и подтверждается достаточной сходимостью результатов натуральных экспериментов и численного моделирования.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие основные научные результаты:

- математическая модель технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи как объекта управления с распределёнными параметрами, проблемно ориентированная на синтез многомерной системы автоматического управления обжигом за счёт согласованного управления скоростью вращающейся печи, загрузкой сырца в печь, осуществляемой ленточным питателем, объёмной тепловой мощностью горелки;

- многомерная система автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита, отличающаяся от известных согласованным управлением скоростью вращающейся печи, загрузкой сырца в печь, осуществляемой ленточным питателем, объёмной тепловой мощностью горелки, и позволяющая осуществлять производство керамзита с заданной величиной прочности;

- результаты численного моделирования объекта и системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита заданной прочности;

**Практическая значимость работы:**

- разработана математическая модель обжига керамзита во вращающейся печи как объекта управления с распределёнными параметрами, и компьютерная модель обжига как многомерного объекта с сосредоточенными параметрами позволяющая производить имитационное моделирование при проектировании с целью получения данных о температурном поле керамзита при вариации управляющих и возмущающих воздействий;

- создана математическая модель многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита, обеспечивающая возможность уточнённой настройки регуляторов при вариации параметров объекта управления;

- разработана методика инженерного проектирования многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита и её техническая реализация, практическое внедрение системы в масштабах отрасли позволит сократить расход газа на 8% при производстве 1м<sup>3</sup> керамзита.

Результаты диссертации также могут быть использованы на предприятиях строительной индустрии, занимающихся производством керамзита.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований, связанные с автоматизацией технологического процесса обжига при производстве керамзита заданной прочности, используются:

- в практике инженерного проектирования на ООО «Керамуз»;
- в учебном процессе при подготовке по направлению «Строительство» бакалавров, профиль «Механизация и автоматизация строительства» и магистров, профиль «Комплексная механизация строительства» в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были представлены в виде статей, докладов и обсуждены на следующих научно-технических конференциях и семинарах: на 11th International Scientific and Practical Conference «Environment. Technology. Resources» (Rezekne, RTA, 2017); на научно-техническом совещании «Применение керамзита и керамзитобетонных изделий в гражданском, промышленном, дорожном и гидротехническом строительстве» (Самара, АО «НИИКЕРАМЗИТ», 2017); на XXIV, XXV R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (24RSP, 25RSP) (Samara, 2015; Zilina 2016); на II Поволжской научно-практической конференции (Казань, КГЭУ, 2016); на научно-технической конференции «Проектирование и строительство доступного и комфортного жилья с применением долговечных, энергоэффективных, пожаробезопасных, экологически чистых и надежных в эксплуатации керамзитобетонных изделий и конструкций» (Самара, ВК «Экспо-Волга», 2015); на Московской международной межвузовской научно-технической конференции

(Москва, МАДИ, 2014); на Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2014» (Самара, СГАСУ, 2014); на I-м Региональном молодежном форуме «Инновационные технологии повышения эффективности транспортных систем» (Самара, СамГУПС, 2013); на Всероссийской межвузовской научно-практической конференции «Компьютерные технологии в науке, практике и образовании» (Самара, СамГТУ, 2011, 2012); на Международной научно-технической конференции «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре» (Самара, СГАСУ, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016); на межвузовской студенческой научно-технической конференции «Студенческая наука. Исследования в области архитектуры, строительства и охраны окружающей среды» (Самара, СГАСУ, 2011); в Тезисах докладов XXXVI Самарской областной студенческой научной конференции (Посвящается 90-летию В.П. Лукачёва) (Самара, СГАУ, 2010).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 26 работ, в том числе 5 работ в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, и 4 публикации, индексируемые международными базами данных Web of Science и SCOPUS, получен 1 патент на изобретение.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка из 146 наименований и 4 приложений. Основной текст изложен на 174 страницах, диссертация содержит: 118 рисунков, 34 таблицы, библиографический список на 14 страницах, приложения на 25 страницах.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи как многомерного объекта управления с распределенными параметрами.

2. Многомерная система автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита.

3. Результаты численного моделирования технологического процесса обжига керамзита и многомерной системы автоматического управления процессом обжига для получения заданной прочности керамзита.

4. Методика инженерного проектирования многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита заданной прочности.

# 1 ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ПЕЧАМИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМЗИТА ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ

## 1.1 Технологические требования, предъявляемые к производству высокопрочного керамзита

Керамзитовый гравий (керамзит) [42] – это искусственный пористый наполнитель ячеистого строения округлой или гравелистой формы с шероховатой поверхностью размером от 5 до 40 мм полученный при вспучивании полуфабриката в результате его обжига.

При производстве керамзитобетонных изделий также находит применение мелкий пористый наполнитель – керамзитовый песок (размер частиц  $0,14 \div 5$  мм), который получают путём обжига глинистых пород во вращающихся и шахтных печах, а также при дроблении крупных кусков керамзита.

Керамзит огне- и атмосфероустойчив, долговечен и не содержит примесей, отрицательно влияющих на цемент и арматуру в легкобетонных конструкциях.

Лёгкий керамзит используют при изготовлении теплоизоляционного и конструкционно-теплоизоляционного керамзитобетона классов В2,5 – В10, для производства стеновых ограждающих конструкций, а также конструкционного керамзитобетона классов В12,5 – В20, используемого в несущих конструкциях.

В настоящее время в России существует крупная база керамзитовой промышленности в образовании, формировании и последующее совершенствование которой существенный вклад внесли российские учёные и исследователи: С.П. Онацкий, И.А. Гервидс, П.П. Будников, В.В. Перегудов, Е.И. Ходоров, в том числе учёные Самарской научной школы: В.В. Еременко, О.Ю. Якшаров, В.П. Петров, М.К. Кабанова, А.Г. Чикноворьян, Б.Д. Комисаренко, В.М. Горин, С.А. Мизюряев, С.Я. Галицков, А.С. Фадеев и др. [2,6,10-13,15,16,33,43], а также зарубежные исследователи: Т.W. Bremner, Т.А. Holm, В.М. Gallaway, В. Martin, J. Ries, R. Gronman, P. Gorman [18,19].

*Факторы, влияющие на прочность керамзита*

В последнее время в строительстве всё чаще применяются высокоэффективные, высокопрочные, тонкостенные, напряженно-армированные конструкции, с использованием конструкционного керамзитобетона классов В20 – В40, где решающее значение имеет высокая прочность, однородность, размер и коэффициент формы зёрен керамзита [1].

Экспериментальные исследования показали [1,2], что особо лёгкий керамзит с насыпной плотностью в 150 – 250 кг/м<sup>3</sup> наиболее эффективен для теплоизоляционных конструкций и засыпок, а сравнительно тяжелый (но при этом высокопрочный керамзитовый гравий с насыпной плотностью 600 – 1000 кг/м<sup>3</sup>, и прочностью 5 – 10 МПа) – для напряженно-армированных конструкций.

Для получения лёгкого керамзита в сырьё вводят добавки, повышающие вспучиваемость глин и уменьшающие насыпную плотность, что сопровождается одновременно значительным снижением прочности продукта и делает его непригодным для приготовления высокопрочного керамзитобетона.

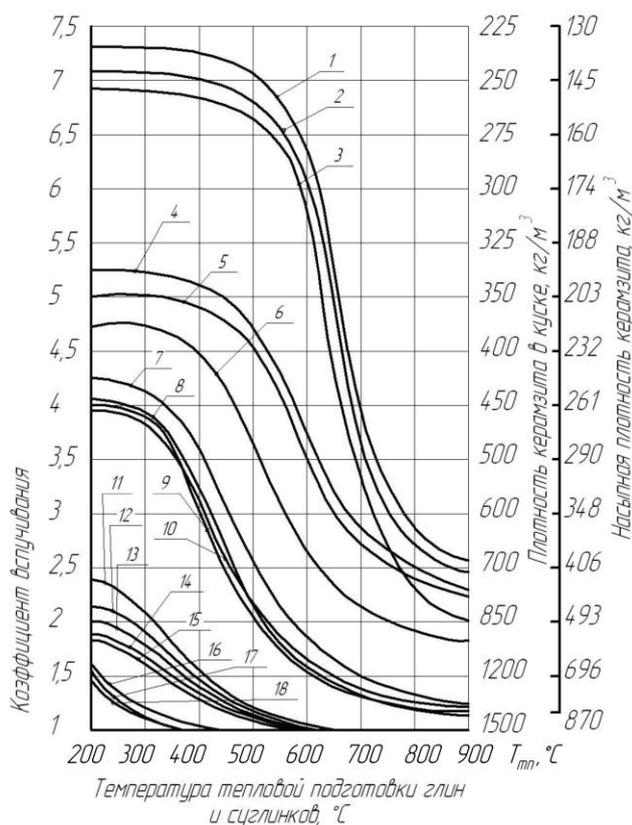
Исследования, выполненные во ВНИИСтроме, свидетельствуют о многообразии причин, влияющих на прочность получаемого керамзитового гравия, и необходимости комплексного учёта физико-химических, технологических и экономических факторов при перевооружении заводов на производство высокопрочного керамзита [1]. Было установлено, что основные строительно-технические показатели керамзита (прочность, плотность и др.) определяются и решающим образом зависят от характера, структуры и строения керамзита. При этом прочность керамзита тем выше, чем меньше общая пористость и размер зёрен заполнителя, толще и прочнее их наружная оболочка и материал стенок между порами, мельче и равномернее распределены поры в стекломассе, больше закрытых округлой формы пор, меньше пористость стенок пор и наружной оболочки. Практическое значение указанных общих закономерностей состоит в том, что они позволяют наметить технологические основы получения высокопрочного керамзита.

Очевидно, что структура керамзита и фазовый состав стекломассы определяются, в первую очередь, свойствами добываемого глинистого сырья,

методами его последующей переработки и способами формования гранул сырца керамзита. Также существенное влияние на формирование высокопрочного заполнителя оказывают условия протекания физико-химических процессов при обжиге и охлаждении.

Установлено, что строительно-технические свойства керамзита, в том числе прочность, в значительной степени обуславливаются свойствами исходного сырья, прежде всего химическим, минералогическим и гранулометрическим составами.

Проведённые исследования [44] по оценке и выбору глинистого сырья для производства высокопрочного керамзита показали необходимость использования тонкодисперсных средне- и слабовспучивающихся железистых глин и суглинков (рис. 1.1) с содержанием: тонкодисперсного, аморфного кремнезёма – 50 - 70%; оксидов железа – 5 - 10%; глинозёма – 15 - 25%; оксида кальция – 2 - 4 %; оксида магния – 2 - 6%; щелочей – 2 - 5%; органических примесей – 0,4 - 0,8%.



**глины:** 1 - нурлатская; 2 - смышляевская; 3 - парсуковская; 4 - чукавинская; 5 - котласская; 6 - волжская; 7 - соколов-сарбаевская; 8 - новоиерусалимская; 9 - лианозовская; 10 - курганская; **суглинки:** 11 - приокский; 12 - рязанский; 13 - бескудниковский; 14 - лосиноостровский; 15 - курский; 16 - новосёловский; 17 - хлюпинский; 18 - соколовский

Рисунок 1.1 – Зависимость насыпной плотности керамзита и коэффициента вспучивания, от температуры тепловой обработки

Особые ограничения предъявляются и к гранулометрическому составу. Содержание в глинистом сырьё кварца (свободного диоксида  $\text{SiO}_{2\text{св}}$ ) не должно превышать 30%. Для получения керамзита насыпной плотностью более  $800 \text{ кг/м}^3$  допускается содержание в глинистом сырьё кварца 40%.

Пригодность конкретного сырья для производства высокопрочного керамзита следует устанавливать только по данным специальных испытаний в лабораторных и полужаводских условиях.

Направление, особенно глубина протекающих физико-химических процессов образования керамзита, и характер образующейся структуры материала в значительной мере предопределяются степенью переработки и гомогенизации глинистого сырья. Известно, что за редким исключением природное глинистое сырьё неоднородно как по составу, так и по структуре. Его химические и минералогические составляющие распределены неравномерно. При этом многие из них, например, железистые, карбонатные и органические, часто находятся не в общей массе, а располагаются на поверхности и по трещинам структурных элементов или образуют гнёзда скоплений. Структура глинистых пород также разнообразна как по характеру, так и по плотности [1].

В производстве высокопрочного керамзита требуется особенно тщательная переработка и гомогенизация глинистого сырья с разрушением природной структуры и достижением равномерного и тонкого распределения по всей массе химических, минералогических и гранулометрических составляющих. Это позволит обеспечить образование однородного расплава; равномерное распределение пор в стекломассе; формирование мелких, округлой формы, закрытых пор; интенсивную кристаллизацию массы при изотермической выдержке в процессе охлаждения (для однородности структуры зёрен) и, как следствие, повысить прочность керамзита.

#### *Требования к качеству керамзитового гравия*

Расширение номенклатуры изделий и конструкций из керамзитобетона и успешное применение керамзитового гравия в различных отраслях народного хозяйства предопределило потребность в производстве заполнителя с заданными

строительно-техническими свойствами: плотностью, прочностью, размером зёрен и коэффициентом их формы [1].

К недостаткам всех лёгких искусственных заполнителей можно отнести неоднородность прочности и объёмного веса отдельных кусков. Керамзитовый гравий, сформованный на прессах в гранулы (по диаметру мало отличающиеся друг от друга), даёт при обжиге приблизительно одинаковую прочность. Прочность же отдельных кусков, например, аглопорита или пемзы весьма различная и изменяется в десятки раз.

Обязательным требованием, предъявляемым к лёгким бетонам, является морозостойкость, которая, в первую очередь, зависит от морозостойкости заполнителя. После проведения ста циклов замораживания зёрна искусственных заполнителей теряют свой первоначальный вес, в частности, керамзит –  $7 \div 14\%$ , аглопорит –  $6 \div 16\%$ , шлаковая пемза – от  $11 \div 57\%$ , топливный шлак –  $37 \div 80\%$ . При этом морозостойкость должна быть не менее 25 циклов. Насыщенный водой керамзитовый гравий, по критерию морозостойкости, должен выдерживать пятнадцать повторных циклов попеременного замораживания при температуре  $-20^{\circ}\text{C}$  и оттаивания в воде при температуре  $+20^{\circ}\text{C}$ . Считается выдержавшим испытание на морозостойкость керамзитовый гравий, если вес разрушившихся зерен в нем не превышает  $10\%$  от первоначальной навески. Водопоглощение керамзитового гравия варьируется в диапазоне от 8 до 20 %, при этом плотность наружной корочки керамзита достаточна, если водопоглощение не превышает  $30\%$ .

По насыпной плотности керамзитовый гравий делится на 13 марок [42]: от М150 до М1000 (табл. 1.1).

К керамзиту предъявляются различные требования в зависимости от того, для какого из лёгких бетонов он предназначен. Лёгкие бетоны [4, 45] делятся на:

- теплоизоляционные с объёмным весом до  $800 \text{ кг/м}^3$  и прочностью на сжатие не менее  $0,3 \text{ МПа}$ ;
- конструктивно-теплоизоляционные (стены зданий) с объёмным весом  $900 - 1200 \text{ кг/м}^3$  и прочностью на сжатие не менее  $1 \text{ МПа}$ ;
- конструкционные (для несущих конструкций) с объёмным весом  $1200 - 1800 \text{ кг/м}^3$  и прочностью на сжатие не менее  $12,5 \text{ МПа}$ .

Для каждой марки по насыпной плотности ГОСТ [42] устанавливает определённые требования к прочности керамзитового гравия при сдавливании в цилиндре и соответствующие им марки по прочности от П15 до П400 (табл. 1.1). Маркировка по прочности служит для определения области рационального применения того или иного керамзита в бетонах соответствующих марок (табл. 1.2).

Таблица 1.1 – Основные характеристики керамзита

Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Марка по насыпной плотности	Марка по прочности	Предел прочности при сдавливании в цилиндре, МПа
100-150	M150	П15	До 0,5
150-200	M200	П15	До 0,5
200-250	M250	П25	0,5 - 0,7
250-300	M300	П35	0,7 - 1
300-350	M350	П50	1 - 1,5
350-400	M400	П50	1 - 1,5
400-450	M450	П75	1,5 - 2
450-500	M500	П100	2 - 2,5
500-600	M600	П125	2,5 - 3,3
600-700	M700	П150	3,3 - 4,5
700-800	M800	П200	4,5 - 5,5
800-900	M900	П250	5,5 - 6,5
900-1000	M1000	П300	6,5 - 8
900-1000	M1000	П350	8 - 10
900-1000	M1000	П400	≥10

Существуют общие требования, которым должен удовлетворять керамзитовый гравий в гранулах, предназначенный для конструктивно-теплоизоляционного и конструкционного бетона. Гранула керамзита состоит из двух элементов, сильно, отличающихся друг от друга: наружной очень плотной корочки тёмно-коричневого цвета толщиной 1 - 2 мм и равномерно пористой внутренней части, обычно тёмного цвета. Наличие на грануле керамзита плотной шероховатой оболочки обеспечивает прочность бетона, хорошее сцепление с цементным тестом, малое водопоглощение и морозостойкость. На основании выше изложенного сформулировано требование, что керамзит должен иметь плотную наружную поверхность и равномерно распределенную мелкопористую ячеистую структуру внутри.

Таблица 1.2 – Соответствие марки заполнителя классу бетона по прочности

Класс бетона по прочности на сжатие	Минимальная марка заполнителя по прочности
B0,75 – B1,5	П15
B2,5 – B3,5	П25
B5	П35
B7,5	П50
B10	П75
B12,5	П100
B15	П125
B20	П125
B22,5	П125
B25	П150
B27,5	П150
B30	П200
B35	П200
B40	П300

Для уменьшения расхода цемента, повышения прочности и морозостойкости керамзита, его поверхность должна иметь минимальное число трещин. Количество гранул, имеющих дефекты поверхности в виде трещин и обнаженных участков с пористой сердцевиной, не должно превышать 15 – 20%.

В соответствии с действующим нормативом [46] и используя результаты [5,44] сформулированы основные требования к керамзиту и сырью для его производства:

а) способность глины и суглинков вспучиваться при термической обработке 1050 – 1260°C с образованием материала ячеистого строения с плотностью 100 – 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент вспучивания – отношение объема вспученной гранулы к объёму гранулы полуфабриката, поступающего на обжиг:

$$k_v = V_2/V_1 = (\rho_1/\rho_2)(1 - \text{ППП}/100), \quad (1.1)$$

где  $k_v$  – коэффициент вспучивания;  $V_1$  и  $V_2$ ,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – объёмы и плотности абсолютно сухого сырца и керамзита (в куске), соответственно; ППП – потери при прокаливании, %.

б) керамзитовый гравий, изготовленный из природного глинистого сырья или с добавками, стимулирующими его вспучиваемость, должен соответствовать требованиям ГОСТ [42];

в) сырьё для производства керамзитового гравия должно соответствовать требованиям ГОСТ [46];

г) максимальная температура вспучивания не должна превышать 1260°С;

д) интервал вспучивания должен быть не менее 40°С.

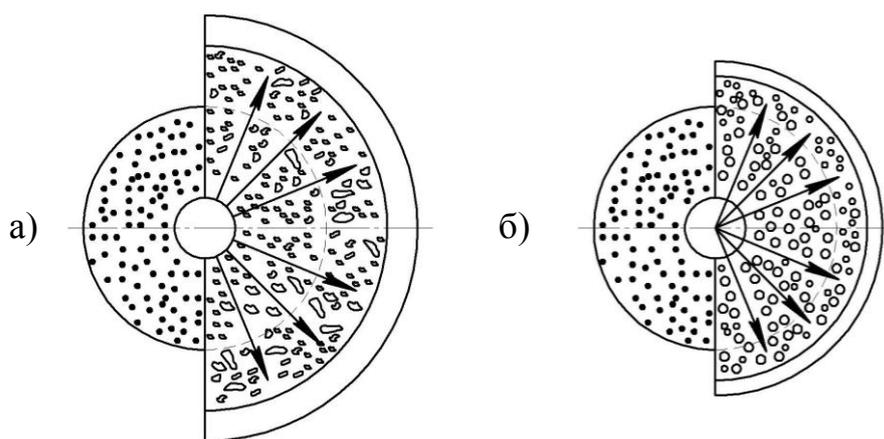
Исследования, проведённые С.П. Онацким [1], показали, что при производстве лёгкого керамзита с несущественными требованиями по прочности, допускается упрощение технологической операции по переработке и гомогенизации сырья, что недопустимо при получении высокопрочного керамзита, где тщательная переработка и тонкая гомогенизация глинистой массы обязательны.

В соответствии с требованиями для производства высокопрочных керамзитобетонных конструкций предельный диаметр зёрен керамзитового гравия не должен превышать 12 ÷ 15 мм. Не менее важное требование предъявляется и к форме зёрен керамзита. Желательно, чтобы коэффициент формы керамзитового гравия приближался к единице и составлял не более 1,2 ÷ 1,3. Для обеспечения необходимых размеров и округлой формы сырца используют грануляцию глинистой массы на кирпичеделательных прессах с перфорированными цилиндрами и головкой с последующей окаткой цилиндров в процессе сушки сырца или без таковой в специальных барабанах-грануляторах, а также грануляцию сырца на тарельчатых грануляторах. С помощью последнего механизма удастся получать заданные размеры 5 ÷ 12 мм и форму гранулы [1].

Поступающий на тепловую обработку и обжиг гранулированный материал, приготовленный из хорошо переработанного гомогенизированного сырья, во избежание образования трещин и разрушения следует подвергать относительно более мягкой и замедленной тепловой обработке (сушке, нагреву).

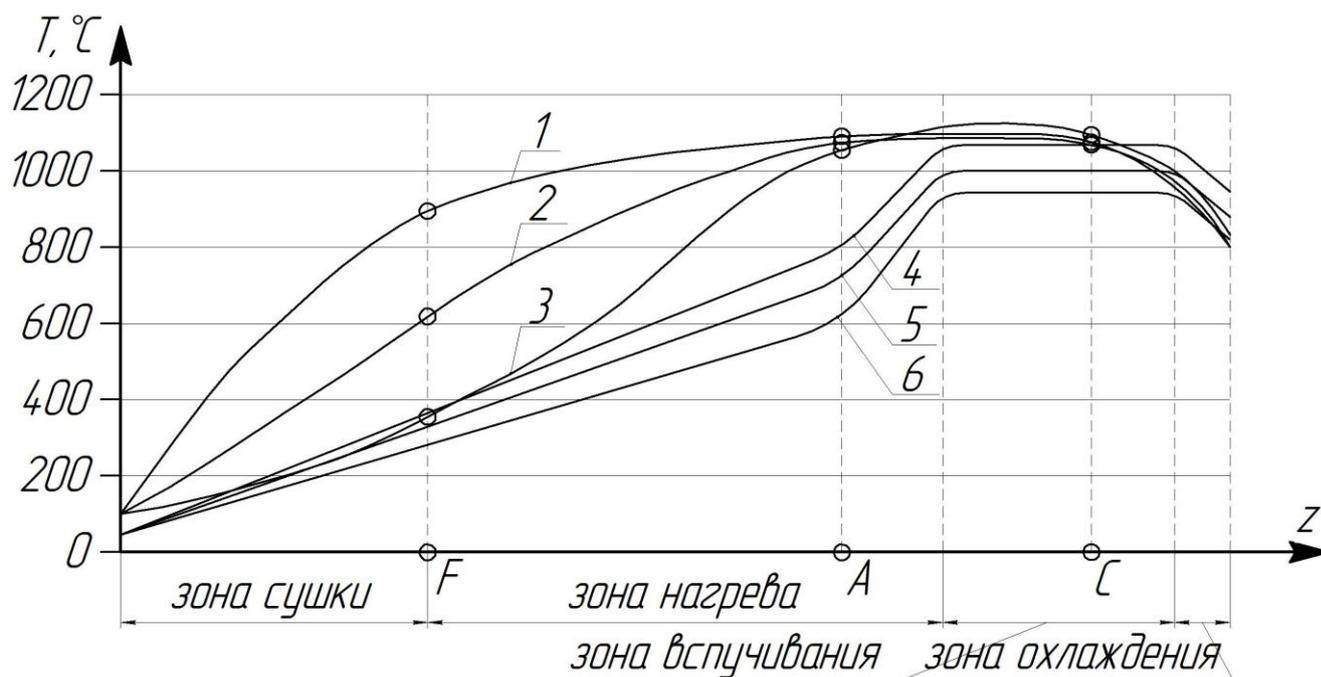
Существенное различие процессов предварительной тепловой подготовки материала перед вспучиванием при получении лёгкого (рис. 1.2,а) и высокопрочного (рис. 1.2,б) керамзита заключается в том, что в первом случае для максимального его вспучивания на кривой обжига создают по возможности рез-

кий технологический перепад (рис. 1.3, кривые 4-6) между температурой в зоне нагрева и вспучивания, тогда как во втором (рис. 1.3, кривые 1-3) – температурный переход более плавный. Это объясняется тем, что при получении высокопрочного керамзита (рис. 1.2,б) материал вспучивается незначительно, поэтому этот процесс имеет подчинённое значение. Главное же усилие направляется на создание условий для образования однородного расплава заданного состава и формирования равномерно-пористой структуры материала с мелкими и мельчайшими закрытыми порами.



а) – лёгкий теплоизоляционный; б) – высокопрочный конструкционный

Рисунок 1.2 – Вспучивание гранул керамзита



1-3 – прочного конструкционного; 4-6 – лёгкого теплоизоляционного

Рисунок 1.3 – Семейство кривых обжига керамзита

Быстрое нагревание перед вспучиванием и кратковременный обжиг материала при повышенной температуре, как это практикуется в производстве керамзита лёгких марок, вызывают растрескивание гранул в зонах сушки и нагрева, а в зоне вспучивания – быстротечный процесс порообразования еще не однородного по составу и реологическим характеристикам расплава. Это обуславливает образование неравномерно пористой структуры с различной величиной взаимно сообщающихся пор, окаймленных поризованными стенками различной толщины. В этих условиях поризованной оказывается и наружная оболочка зёрен керамзита. Развитие процесса в таком направлении, хотя и сопровождается интенсивным вспучиванием, но приводит к большой потере относительно прочности [1].

Для увеличения прочности керамзита необходимы как меньшая общая пористость материала, так и условия для «спокойной» поризации, когда образование равномерно пористой структуры не нарушается местными «вспышками», вызванными неравномерным газообразованием в неоднородной по составу и реологическим свойствам среде (пиропластической массе).

При производстве лёгких теплоизоляционных марок керамзита время нахождения сырца керамзита во вращающихся печах в зонах сушки и нагрева составляет  $20 \div 30$  мин, а в зоне вспучивания около  $10 \div 15$  мин. При получении же высокопрочного керамзита время предварительной тепловой подготовки (сушка и нагрев) увеличивается до  $30 \div 50$  мин, а обжиг со вспучиванием до  $15 \div 30$  мин, или примерно в  $1,5 \div 2$  раза. Не исключена при этом возможность рационального перераспределения основных технологических зон в печи.

Что касается оптимального состава расплава, то с учётом экспериментального и производственного опыта [1] следует полагать, что наиболее прочные стекла дают расплавы на основе аморфного кремнезема и

оксидов железа, а также щелочных земель. Как показали исследования [1], только при рациональном режиме охлаждения керамзита, предусматривающем его изотермическую выдержку в течение  $15 \div 20$  мин в пределах  $700 \div 900^\circ\text{C}$ , прочность керамзита можно увеличить в  $1,25 \div 2$  раза без использования добавок. При этом установлено, что в процессе изотермической выдержки, во-первых, снимаются внутренние напряжения, действие которых обуславливает раннее или позднее образование трещин зёрен и потерю прочности и, во-вторых, образуется и накапливается мелкокристаллическая фаза с участием катализаторов кристаллизации, в значительном количестве содержащихся в природном сырье –  $\text{TiO}_2$  (диоксид титана),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (эсколайт) и др.

Обобщённой характеристикой технологического процесса, протекающего от загрузки сырца до выгрузки керамзита во вращающейся печи, как было сказано выше, является кривая обжига  $T(z)$  (рис. 1.2, рис. 1.3, кривые 1 – 3) [1], которая представляет собой изменение температуры  $T$  керамзита по длине  $z$  печи  $2,5 \times 40\text{м}$ . В работах [1,6,10] показано, что производство лёгкого керамзита с насыпной плотностью  $\rho = 150 - 250 \text{ кг/м}^3$  и прочностью  $R = 0,5 - 2 \text{ МПа}$  в значительной мере определяется параметрами кривой (рис. 1.3, кривая 3) в сечениях А и С, которые характеризуют окончание зоны нагрева и середину зоны вспучивания, соответственно. Управление температурными режимами печи в этом случае осуществляется с помощью изменения тепловой мощности горелки  $Q_f$  и вариации загрузки печи  $q_z$  [10] в условиях вращения печи с номинальной угловой скоростью  $\omega_{\text{п.ном}}$ . В настоящее время в строительном производстве при сооружении мостов, железобетонных труб, несущих стеновых панелей жилых зданий и промышленных сооружений, а также дорог, аэродромных покрытий и тротуаров широко применяется керамзит высокой прочности  $5 \div 10 \text{ МПа}$ . Анализ кривых обжига (рис. 1.3) керамзита и результаты исследований [33,47,48]

показывают, что технология производства такого керамзита связана с его обжигом при более низких (по сравнению с лёгким керамзитом) скоростях [1] вращения печи (рис. 1.3, кривые 1, 2), что позволяет выявить ещё одно характерное сечение печи – сечение F, расположенное в окрестности конца зоны сушки, где величина R зависит, преимущественно, от температуры  $T_F$  керамзита. Величина  $T_F$ , в свою очередь, определяется в значительной мере скоростью  $\omega_p$  вращения печи.

Так как при производстве высокопрочного керамзита предъявляются повышенные требования к переработке сырья, размеру, форме и прочности керамзита, вызывающим значительное увеличение насыпной плотности заполнителя, снижение вспучиваемости сырья и уменьшение коэффициента выхода материала из печи, производство высокопрочного керамзита несколько дороже, чем лёгких марок. Однако на себестоимость высокопрочного керамзита может оказать решающее влияние производительность вращающихся печей. С одной стороны, резкое снижение вспучиваемости исходного сырья и увеличение насыпной плотности керамзита должны сопровождаться соответствующим снижением коэффициента выхода из печи в единицу времени готового продукта и сокращением её производительности. С другой стороны, анализ специфических условий обжига высокопрочного керамзита дает основание утверждать, что резкого снижения производительности вращающихся печей при переходе на обжиг высокопрочного керамзита не произойдет [1]. Это происходит потому, что в производстве лёгких марок керамзита, стремясь получить максимальное вспучивание материала, его обжиг ведут при температурах, близких к слипанию сырца в конгломераты. Коэффициент заполнения печей при этом не превышает 4 – 5 %, т.к. высока опасность агломерации зёрен. При производстве же высокопрочного керамзита с относительно большой насыпной плотностью нет

необходимости в интенсивной поризации материала, поэтому температура обжига может быть несколько понижена и опасность слипания зерен в конгломераты исчезнет. В этих условиях появится возможность в  $2 \div 3$  раза увеличить коэффициент загрузки печи, что может полностью компенсировать снижение производительности из-за уменьшения коэффициента выхода материала и увеличения продолжительности как тепловой обработки, так и обжига.

Известно, что конструкционные лёгкие бетоны с заполнителем из прочного керамзита дают технико-экономическую эффективность при изготовлении несущих конструкций в жилищном, гражданском, промышленном строительстве, а также в дорожном строительстве и в мостостроении [2]. Например, при строительстве гостиницы в Лос-Анджелесе за счёт использования керамзитобетона вместо традиционного тяжёлого бетона удалось снизить массу здания на 33,5 тыс. т, что также сократило затраты на возведение здания на 15% [1]. Чрезвычайно актуальным является получение строительных материалов высокого качества для современного дорожного строительства. Высокопрочный керамзит (дорзит – дорожный керамзит) был получен в Омске из местных суглинков. Дорзит успешно применялся в асфальтобетонных смесях для дорожных покрытий, откуда и получил своё название [49]. Большой эффект даёт применение высокопрочного плотного заполнителя типа керамдора при строительстве аэродромных полос, а также дорог в районах со сложными климатическими условиями.

Известен положительный зарубежный опыт по использованию высокопрочного гранулированного керамического материала (аналог тяжёлому керамзиту) при строительстве дорог, мостов в США, Японии, Норвегии, Германии, Финляндии и других странах [1,50]. В нашей стране имеется многосторонний опыт применения высокопрочного керамзитобетона при

строительстве автодорожных мостов, аэродромных покрытий (лёгкие бетоны М300÷500), сборных плит для автомобильных дорог, что даёт экономический эффект 12-15% [51,52].

Большой объём исследовательских и опытно-экспериментальных работ, выполненных в НИИЖБ, МИСИ, НИИСтром и др., показал, что конструкционные керамзитобетоны марок прочности М300÷500 средней плотностью 1500-1800 кг/м<sup>3</sup> обладают повышенной деформативностью (по сравнению с тяжелыми бетонами), высокими показателями ударной вязкости, повышенной предельной нагрузкой трещинообразования, пониженной теплопроводностью и равными с тяжёлыми бетонами показателями истираемости [2].

Проведённые испытания на морозостойкость (путём периодического замораживания (-20°С) и оттаивания) образцов конструкционного керамзитобетона, насыщенных обычной и морской водой показали, что после 300-400 циклов образцы сохранили свой первоначальный вид (без разрушений); потеря прочности не превышала 15 % (работы В.Г. Батракова, Л.И. Карликовой и др.) [52].

Известны также результаты работ НИИЖБ, где исследован конструкционный керамзитобетон М300÷350. После 600 циклов замораживания-оттаивания прочность бетонов возросла (на протяжении данного испытания в бетоне преобладали конструктивные процессы, связанные с продолжающейся гидратацией вяжущего и явлениями самозалечивания). За счёт введения в керамзитобетонную смесь специальных добавок можно повысить морозостойкость керамзитобетона в 2-3 раза. Проводились натурные испытания конструкционного керамзитобетона в условиях Дальнего Севера (в естественных условиях на Кольском заливе на специальном стенде). В результате испытания в

зоне переменного уровня моря керамзитобетон выдержал более 1000 циклов переменного замораживания и оттаивания.

Таким образом, большой объём исследований опытных и промышленных испытаний свидетельствует, что высокопрочный керамзитобетон обладает высокими эксплуатационными качествами при работе в сложных условиях, что является важным обстоятельством для использования в дорожном строительстве, мостостроении, в прокладке железобетонных труб, а также в других армированных конструкциях. Теплоизолирующая способность и низкотемпературная трещиностойкость дают этому материалу преимущество в районах с жёсткими климатическими условиями.

Целесообразность применения высокопрочного керамзитобетона в аэродромных покрытиях была подтверждена исследованиями, выполненными в НИИЖБ, МАДИ, Союздорнии, результаты которых позволили начать строительство первого в отечественной и зарубежной практике монолитного аэродромного покрытия из конструкционного керамзитобетона М300.

Конструкционный керамзитобетон марок М300÷400 в сборных аэродромных предварительно напряженных плитах покрытия даёт положительную эксплуатационную и технико-экономическую эффективность благодаря повышенной трещиностойкости, морозостойкости, долговечности (при этом уменьшаются изгибающие моменты на 18-20%; снижается количество стержневой арматуры на 12-15%) [53].

Известен длительный положительный опыт эксплуатации отечественных мостов из керамзитобетона. Примером тому служит спроектированный и построенный в нашей стране по предложению МАДИ первый в Европе предварительно напряженный балочный пятипролётный мост из керамзитобетона марок М300 ÷ 500.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод об актуальности производства высокопрочного керамзита. Используемое в настоящее время управление обжигом керамзита «вручную» не обеспечивает производство продукта с прочностью в требуемых пределах. Поэтому необходимо разработать систему автоматического управления вращающейся печью, которая позволит снизить расход топлива, уменьшить процент брака и обеспечит выпуск керамзита требуемой марки по прочности.

Проведённый анализ технологии обжига прочного керамзита, а также применяемого при этом оборудования, показывает, что для создания системы автоматического управления вращающейся печью для обжига керамзита со стабильным значением требуемой прочности необходимо соблюдать монотонную кривую обжига (рис. 1.3, кривые 1 – 3), которую формируют температуры в трёх сечениях вращающейся печи: главным образом в конце зоны сушки (точка F), а также в конце зоны нагрева (точка A) и в середине зоны вспучивания (точка C). Поддержание температур в этих точках можно обеспечить за счёт согласованного управления скоростью вращения печи, величиной загрузки сырца в печь, объёмной тепловой мощностью горелки.

## **1.2 Технологический процесс обжига керамзита**

Производство керамзита осуществляется технологическим комплексом [26,54-56] (рис. 1.4), состоящим, как минимум из вращающейся печи, ленточного питателя, газовой горелки, барабанного холодильника, сушильного барабана, дымососа, шнекового пресса, соответствующих им приводных двигателей АД1–АД7 и преобразователей частоты СПЧ1–СПЧ3. В зависимости от конкретного производства двигатели могут быть управляемыми и не управляемыми, а некоторые операции, такие как управление горелкой и величиной загрузки сырца керамзита, могут осуществляться «вручную».

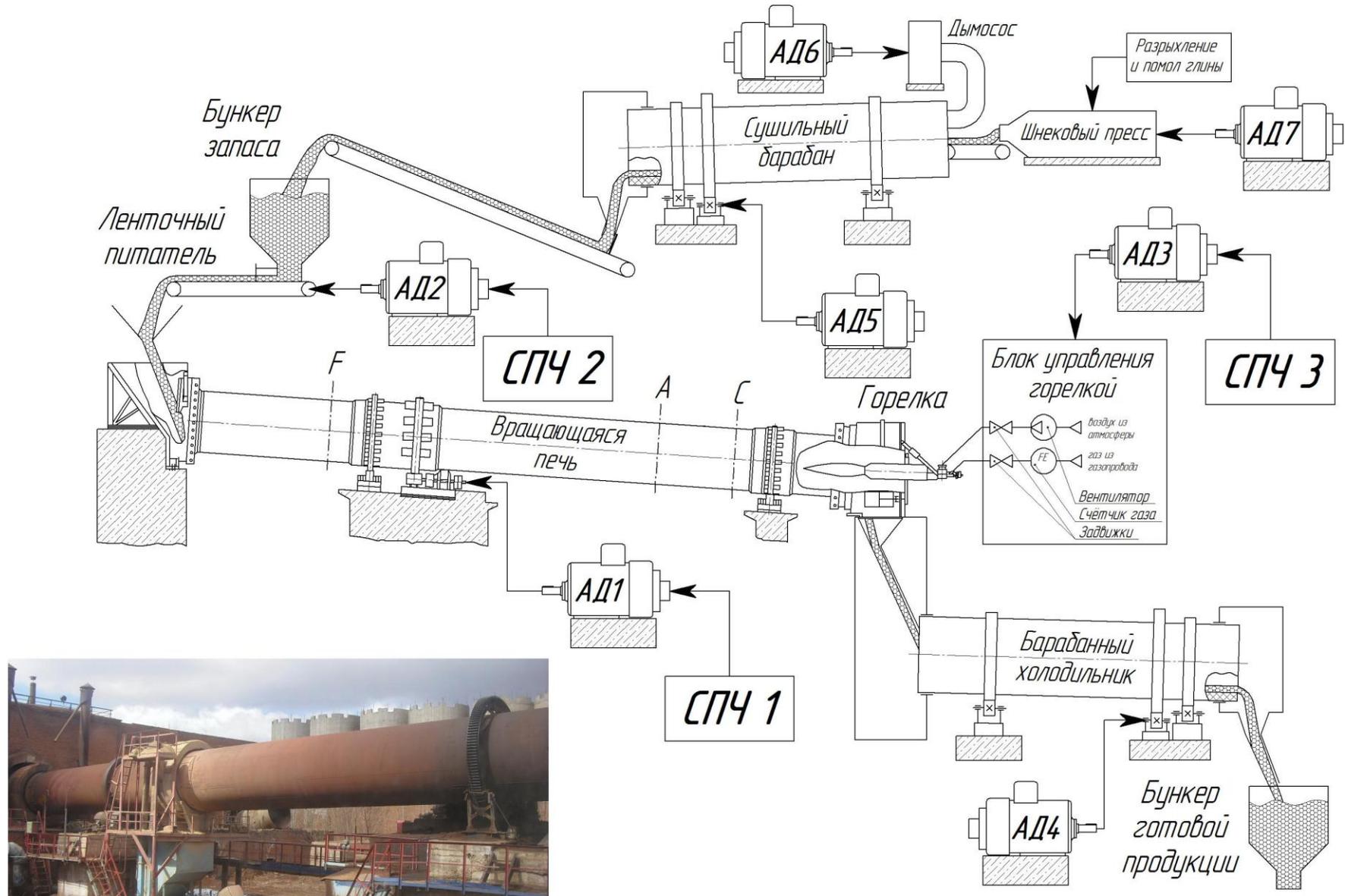
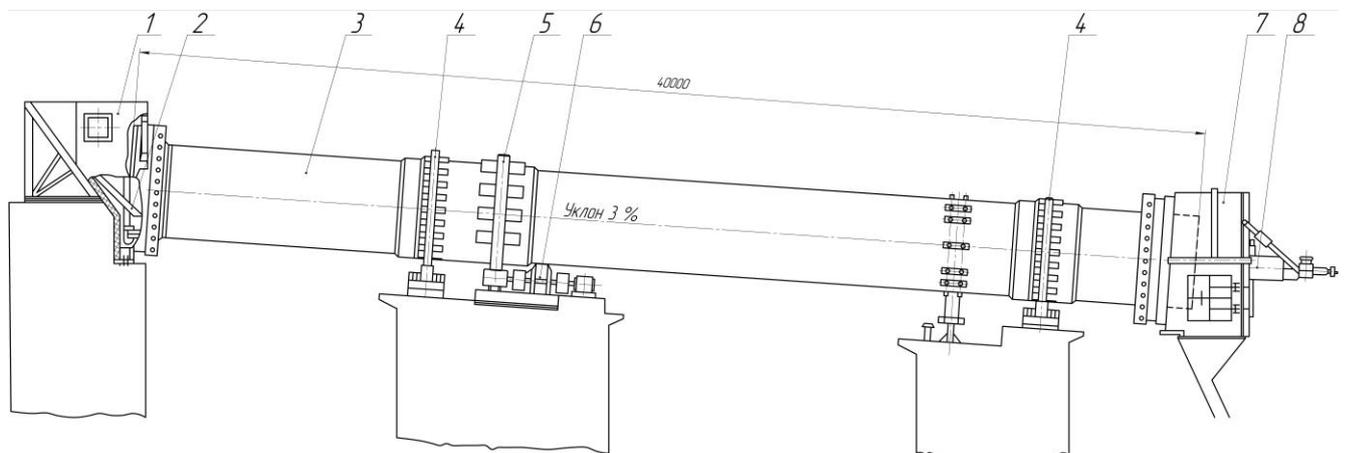


Рисунок 1.4 – Технологический комплекс производства керамзита

Обжиг в производстве керамзита – главная и наиболее ответственная операция. Самыми важными факторами при производстве керамзита являются скорость его нагревания, температурный и газовый режим во время обжига и вспучивания. Их регулирование в значительной мере обусловливается конструктивными особенностями вращающихся печей, которые широко применяются для обжига керамзита.

Вращающиеся печи получили наибольшее распространение для производства керамзитового гравия (численность парка составляет более 500 единиц). В основном используются печи трёх типоразмеров: 40×2,5, 22×2,3 и 12×1,6 м [5], из которых более половины (62% печного парка) составляют печи длиной 40м (рис. 1.5). Поэтому в рамках данной работы ограничимся рассмотрением печи 40×2,5 м.



- 1 – пылесадительная камера; 2 – питательная течка; 3 – корпус печи;  
 4 – роlikоопоры; 5 – зубчатая венцовая шестерня; 6 – основной привод;  
 7 – разгрузочная головка печи; 8 – горелка (форсунка)

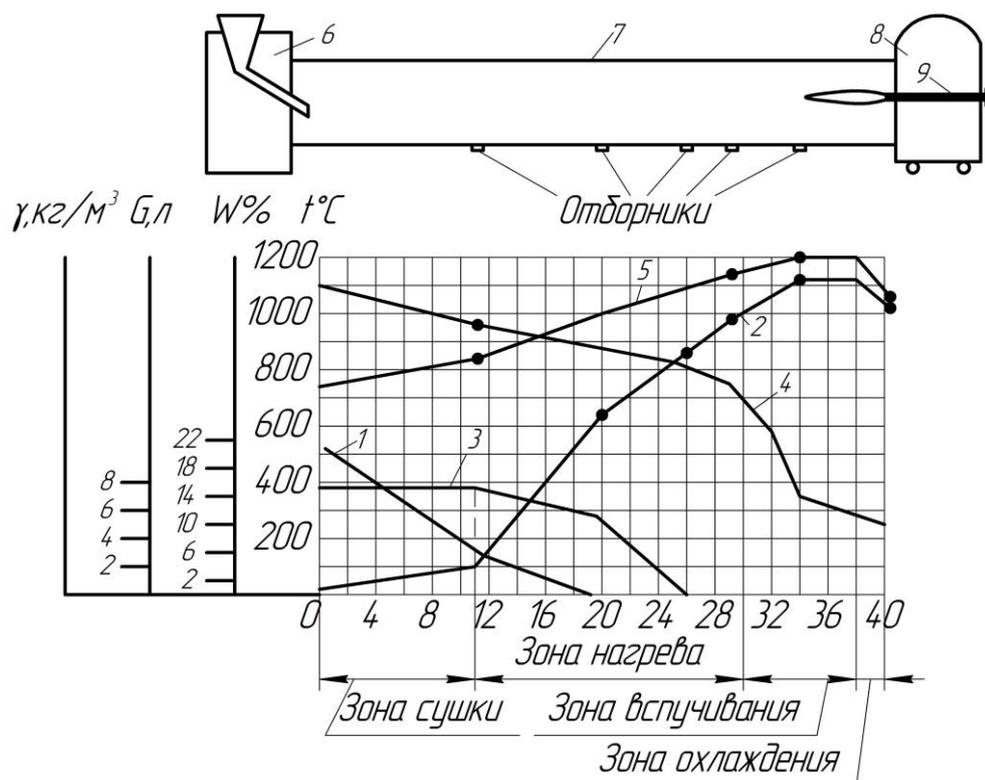
Рисунок 1.5 – Цилиндрическая однобарабанная вращающаяся печь для производства керамзита типоразмера 40×2,5 м

Вращающаяся печь (рис. 1.5) представляет собой цилиндрический металлический барабан, футерованный изнутри огнеупорным кирпичом, расположенный с уклоном около 3%, вращающийся вокруг своей оси со скоростью 2,52 об/мин. Сырьевые гранулы, поступающие из питательной течки в

холодный конец печи, за счёт вращения барабана постепенно перемещаются к горячему концу, где находится горелка, работающая на жидком или газообразном топливе. Это означает, что вращающаяся печь работает по так называемому принципу противотока: гранулы сырца керамзита движутся навстречу потоку горячих дымовых газов, сушатся, нагреваются и, наконец, попав в зону наиболее высоких температур под факелом горелки, вспучиваются. Время пребывания сырца керамзита во вращающейся печи составляет 40 – 80 мин в зависимости от скорости вращения [1,5].

Процессы, происходящие в 40 – метровой вращающейся печи при обжиге лёгкого керамзита из неподсушенных глиняных гранул, представлены на совмещенной диаграмме (рис. 1.6) [5], на которой выделены четыре технологические зоны (последовательные участки во вращающейся печи различной длины, соответствующие изменению свойств материала сырца под действием температуры): сушки, нагрева (совпадающие с зонами дегидратации, декарбонизации), вспучивания и охлаждения (совпадающие с зонами окислительно-восстановительных реакций). Кривая 1 (рис. 1.6) показывает, что основная часть свободной влаги удаляется на длине равной 11 м в зоне сушки, когда температура материала находится в диапазоне 20 – 100°C (кривая 2). Летучие вещества, состоящие в основном из кристаллизационной воды, при этой температуре не удаляются (кривая 3), а плотность материала (кривая 4) снижается медленно, преимущественно за счёт подсушки гранул. Температура газов в этой зоне достаточно высокая (700 – 850°C), но поскольку сырец керамзита поступает в печь с 15 – 25% влажностью, его температура повышается достаточно медленно. Коэффициент теплообмена в этой зоне составляет 145 – 232 Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Зона нагрева в данном случае составляет 19 м. В ней на участке 15 м испаряются остатки гигроскопической (связанной) влаги, полностью уходят летучие вещества, сырец керамзита нагревается со 100 до 875°C при температуре дымовых газов во вращающейся печи 850 – 1100°C. В это время плотность гранул продолжает равномерно уменьшаться за счёт испарения остатков гигроскопической и гидратной влаги и некоторого количества других летучих веществ. Коэффициент теплообмена в этой зоне составляет 105 – 128 Вт/(м<sup>2</sup>·°C).



- 1 – свободная влага; 2 – температура сырца керамзита; 3 – летучие вещества;  
 4 – средняя плотность гранул сырца; 5 – температура дымовых газов во  
 вращающейся печи; 6 – загрузочная головка печи; 7 – вращающаяся печь;  
 8 – разгрузочная головка печи (откатная); 9 – горелка

Рисунок 1.6 – Графики процессов, протекающих при обжиге керамзита во вращающейся печи

Зона вспучивания (рис. 1.6) представляет из себя короткий участок длиной 8м. Здесь плотность гранул керамзита практически скачкообразно падает с повышением его температуры до 1125°C. На участке в конце зоны вспучивания длиной 4 м температура газов и материала продолжает оставаться стабильной, а плотность гранул продолжает несколько уменьшаться, поскольку материал их в этой зоне находится в пиропластическом состоянии.

Зона охлаждения очень короткая – всего 2 м. В ней температура материала понижается от конечной 1125 до 1025°C и соответственно уменьшается температура газов.

При пластичном способе производства влажность сырца, поступающего в печь, колеблется от 0 до 30% [1,4,57]. Сырец имеет минимальную или среднюю влажность 5 – 20% в том случае, если сушка полуфабриката выносится за пределы вращающейся печи, например, при использовании сушильного барабана. Если же сырец сразу загружается во вращающуюся печь, влажность может достигать 25 – 30%.

### **1.3 Обзор известных систем управления вращающимися печами для обжига керамзита**

В настоящее время оборудование по производству керамзита оснащается современными средствами и устройствами автоматики. Но они, в большинстве своём, используются лишь для мониторинга, контроля действий оператора, удаленного управления, архивизации данных технологического процесса, контроля надлежащего состояния футеровки вращающихся печей, сигнализации об аварийных ситуациях и т.д. Например, диссертационные работы М.В. Шубина «Автоматическая система упреждения аварий (разрушения огнеупорной футеровки) мощных вращающихся печей» [7] и В.Г. Торгунакова «Тепловой неразрушающий контроль вращающихся обжиговых печей» [8] направлены на контроль технического состояния печей на основе анализа факторов, влияющих на их работу, что лишь косвенно влияет на качество производимого продукта. Шубиным М.В. создана информационная система обнаружения дефектов во вращающихся печах и разработана методика регулирования теплового режима вращающейся печи при обнаружении дефектов её корпуса. Исследования В.Г. Торгунакова направлены на моделирование механических и тепловых процессов, протекающих во вращающихся печах посредством решения задачи нестационарного теплообмена, и создание методики многослойной теплозащиты и управления тепловым режимом вращающихся печей посредством неразрушающего контроля.

При этом вопросы, направленные на разработку системы автоматического управления вращающимися печами для обжига керамзита, обеспечивающие

стабилизацию его температуры в зонах вращающейся печи, насыпной плотности и прочности керамзита путём стабилизации температуры во вращающейся печи, не были рассмотрены. Это объясняется целым рядом факторов, влияющих на процесс обжига керамзита и усложняющих автоматизацию вращающейся печи, таких как: сложность физико-химических превращений, происходящих в процессе обжига керамзита во вращающейся печи; состав глины; гранулометрический состав сырца и его влажность; изменения сезонности и температуры окружающей среды; температура и состав газа и воздуха, подаваемых в горелку.

Макаровым Б.Н. было проведено диссертационное исследование на тему «Моделирование и управление процессами тепломассопереноса при обжиге керамзита в противоточных барабанных агрегатах» [9]. В ней рассматривается управление тепловыми процессами за счёт изменения загрузки сырца во вращающуюся печь, а также частоты вращения всей печи или её секций. При этом автор не учитывает взаимовлияние загрузки, скорости вращения печи и температуры под факелом горелки, процесса оперативной корректировки параметров и, соответственно, их совокупное влияние на весь процесс обжига керамзита. К тому же модель, созданная Б.Н. Макаровым, не направлена на синтез системы автоматического управления вращающейся печью, что также затрудняет получение керамзита с требуемыми нормативными показателями.

В диссертационной работе Д.А. Юдина «Автоматизированная система управления вращающимися печами с применением технического зрения» [58], автор рассматривает автоматизированную советующую нечёткую систему управления вращающейся печью для производства цемента, которая позволяет с помощью технического зрения контролировать температуру, угол подъёма и размер гранул клинкера. Но при этом созданная советующая система не позволяет полностью исключить человеческий фактор (задержка по времени на принятие решения оператором). К тому же измерение температуры материала осуществляется косвенно, что вносит дополнительную погрешность.

НИИКерамзит спроектировал две системы [20]: первая – «Система автоматического управления расходом топлива во вращающейся печи для обжига керамзитового гравия» посвящена вопросам, связанным с возможностью регулирования температуры в зоне вспучивания путём изменения подачи топлива в форсунку печи по сигналу от двух термопар в защитных чехлах специальной конструкции, установленных в зоне вспучивания. ТермоЭДС термопар с помощью токосъёмного устройства подается на измерительный блок контура регулирования и для регистрации температуры обжига – на автоматический электронный потенциометр. Электронный регулятор по сигналу термопар включает исполнительный механизм, сочлененный с регулирующим органом на топливной магистрали. За счёт системы происходит облегчение работы обжигальщика, а корректировка расхода топлива обеспечивает экономический эффект. Во второй работе – «Система автоматического корректирования температуры вспучивания по насыпной плотности керамзита» для измерения насыпной плотности керамзита разработан автоматический измеритель периодического (примерно через 2-3 мин.) действия. Измеренное значение регистрируется на диаграммной ленте вторичного прибора и вводится в корректирующий регулятор, который изменяет задание стабилизирующему регулятору температуры в соответствии с величиной и направлением отклонения насыпной плотности, вызванным возмущающими факторами (в основном, изменением физико-химических свойств сырья и т.д.). При изменении гранулометрического состава сырцовых гранул изменение насыпной плотности определяется этим фактором, а не степенью обжига.

Системы, разработанные НИИКерамзит, не позволяют выполнить поставленную задачу автоматического управления вращающейся печью, так как в них не осуществляется контроль температуры в зонах сушки и нагрева. Следовательно, такой обжиг не может обеспечить требуемую высокую прочность керамзита, зависящую от температур во всех зонах вращающейся печи, появляются трудности с обеспечением большого диапазона марок по насыпной плотности и прочности выпускаемого керамзита. Измерение насыпной плотности

путём отбора керамзита происходит периодически, а не постоянно, и, соответственно, изменение его насыпной плотности происходит с существенным запаздыванием, что также приводит к увеличению процента брака.

Фадеевым А.С. в его диссертационном исследовании «Автоматизация технологического процесса вспучивания керамзита во вращающейся печи» [6] предложена система автоматического управления технологическим процессом вспучивания керамзита во вращающейся печи. В ней за счёт установленных термопар в зонах вспучивания и нагрева отслеживается температура керамзита. На основе этих данных, за счёт согласованного управления загрузкой сырца в печь и температурой под факелом горелки происходит стабилизация требуемого значения насыпной плотности, что приводит к снижению энергозатрат на производство керамзита. Но при этом система, созданная Фадеевым А.С., направлена, главным образом, на получение только лёгкого теплоизоляционного керамзита. В его работе скорость вращения печи принимается постоянной, температура в зоне сушки не контролируется, что не позволяет при использовании данной системы получать высокопрочный конструкционный керамзит.

#### **1.4 Задачи автоматического управления вращающимися печами для обжига керамзита заданной прочности**

Выполненный анализ известных методов и средств, направленных на совершенствование производства керамзита путём его обжига во вращающейся печи, показывает, что используемые средства автоматизации, применяемые исключительно для мониторинга, контроля действий оператора и удаленного управления, а также ручное управление температурным режимом печи обжигальщиком не эффективны для получения керамзита с требуемой насыпной плотностью и, что более важно, для конструкционного керамзита с высокой прочностью R. Рассмотренные системы управления вращающимися печами [6-9,16,20,58] дают положительный эффект при обжиге керамзита, но не обеспечивают автоматическое управление скоростью печи в функции величины обжигаемого керамзита и, тем самым, не позволяют получать высокопрочный

керамзит. Сложность синтеза систем подобного класса объясняется, прежде всего, отсутствием математических моделей обжига керамзита в печи с регулируемой скоростью вращения. Разработке такой модели, в частности, и посвящена настоящая работа.

Созданная ранее математическая модель обжига керамзита как многомерного объекта управления с распределёнными параметрами [10] и выполненные на ней исследования (результаты которых представлены в работах [6,16,17]) показали, что введение в рассмотрение двух сечений по длине печи с координатами  $Z_C$  и  $Z_A$  (сечения С и А), температура керамзита в которых может регулироваться двумя управляющими воздействиями – мощностью горелки  $Q_G$  и загрузкой печи  $q_3$ , позволяет обеспечить производство керамзита со стабильным значением насыпной плотности  $\rho$  (при этом требуемое значение  $\rho$  может регулироваться в области известных ограничений) путём оснащения печи двумя взаимосвязанными системами автоматического управления. Одна из этих систем осуществляет управление температурой  $T_A$  в сечении А, другая – температурой  $T_C$  в сечении С. С помощью модели [6,10] определены функциональные зависимости  $T_A = f_1(Q_G, q_3)$ ,  $T_C = f_2(Q_G, q_3)$ , получена структура печи как двумерного объекта управления с векторами выходных координат  $\bar{X} = [T_A, T_C]$  и управляющих воздействий  $\bar{U} = [Q_G, q_3]$ , определены аналитические выражения операторов этой структуры.

Для расширения области управляемости процесса обжига и получения керамзита с требуемой высокой прочностью  $R$  произведена дальнейшая разработка математической модели обжига [34] (рассмотрена в главе 2 настоящей диссертации), которая позволила выявить ещё одно характерное сечение печи с координатой  $Z_F$  (сечение F), где температурный режим керамзита регулируется, главным образом, скоростью  $\omega_n$  вращения печи и, соответственно, ввести в рассмотрение в качестве дополнительного элемента вектора  $\bar{X}$  выходных координат объекта управления температуру  $T_F$ , а вектор управляющих

воздействий  $\bar{U}$  дополнить скоростью  $\omega_{п}$ . Установлено [33,34], что значения температуры керамзита в сечениях F, A и C с достаточной степенью точности находятся на экспериментальных кривых обжига [1], а именно: F – в конце зоны сушки, A – в конце зоны нагрева, C – в середине зоны вспучивания [59]. В связи с этим считаем целесообразным при решении задачи производства керамзита со стабильным значением R реализовать управление печью в функции температуры  $T_F$ . Такой подход представляет собой развитие методов управления вращающейся печью, предложенных в [6,16,60,61].

Для автоматического управления вращающейся печью и поддержания требуемого значения прочности керамзитового гравия в процессе обжига во вращающейся печи требуется решить следующие задачи:

- создание математических моделей теплофизических процессов обжига керамзита во вращающейся печи как объектов управления с распределёнными (для уточнённых расчетов) и сосредоточенными (для синтеза многомерной системы автоматического управления) параметрами;

- структурный синтез многомерной системы автоматического управления обжигом керамзита во вращающейся печи обеспечивающей формирование требуемой кривой обжига керамзита, соответствующей заданной прочности, где вектор выходных координат включает в себя значения температуры керамзита в трёх характерных сечениях печи, компонентами вектора управляющих воздействий являются скорость вращения  $\omega_{п}$ , печи величина загрузки  $q_3$  печи, объёмная тепловая мощность  $Q_r$  горелки; а в качестве основного возмущения рассматривается влажность  $w$  сырца керамзита;

- создание комплекса вычислительных моделей, ориентированных на моделирование процессов в объекте и многомерной системы управления обжигом керамзита, разработку методики численного моделирования технологического процесса обжига керамзита;

- разработка инженерной методики проектирования многомерной системы автоматического управления обжигом керамзита во вращающейся печи и её техническая реализация.

## Выводы по первой главе

1. Установлено, что существенное различие при получении лёгкого или прочного керамзита заключается в процессе управления формой кривой обжига. При производстве лёгкого керамзита заданной плотности управление осуществляется двумя воздействиями: загрузкой  $q_3$  сырца и объёмной тепловой мощностью  $Q_r$  горелки. При этом в кривой обжига создаётся желаемый технологический перепад по температуре между зонами нагрева и вспучивания. Это необходимо для получения требуемого значения насыпной плотности  $\rho$ . При изготовлении прочного керамзита кривая обжига в зонах сушки и нагрева должна иметь монотонно нарастающий характер и сохранять постоянство температуры в зоне вспучивания (в диапазоне  $950 - 1100^\circ\text{C}$ ). С этой целью в технологическом процессе используется третье управляющее воздействие – скорость  $\omega_n$  вращения печи, оказывающая влияние на форму кривой обжига в конце зоны сушки и в значительной мере определяющая величину прочности  $R$  керамзита.

2. Выявлено, что для автоматизации производства керамзита требуемой прочности и дальнейшего её поддержания в процессе обжига необходимо осуществить управление вращающейся печью для обжига керамзита путём автоматического согласованного управления температурным полем печи как минимум в трёх сечениях (F, A и C), поскольку каждое из имеющихся трёх управляющих воздействий – скорость вращения печи  $\omega_n$ , объёмная тепловая мощность горелки  $Q_r$ , величина загрузки сырца  $q_3$  керамзита, оказывают влияние на температуру в соответствующем ему сечении, при этом координаты  $Z_F, Z_A, Z_C$  определяются наибольшей зависимостью температуры от конкретного воздействия. Необходимо установить зависимости влияния всех управляющих воздействий и возмущающих факторов на температуру в этих сечениях.

3. Анализ известных методов, средств автоматизации и систем автоматического управления вращающимися печами для обжига керамзита показал, что их использование не позволяет в полной мере решить актуальную задачу производства керамзитового гравия со стабильной требуемой величиной прочности.

4. Определены задачи исследования, которые включают разработку требований к системе автоматического управления вращающейся печью для обжига керамзита, синтез математических моделей процесса обжига керамзита как объекта управления, построение системы автоматического управления вращающейся печью с согласованным управлением скоростью вращения печи, тепловой мощностью горелки и загрузкой сырца керамзита, проведение численного моделирования, разработку методики инженерного проектирования многомерной системы автоматического управления вращающейся печью.

## 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБЖИГА КЕРАМЗИТА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

### 2.1 Определение объекта управления, управляющие и возмущающие воздействия

Для получения керамзита с требуемыми показателями прочности и насыпной плотности в данном исследовании предлагается использовать технологический комплекс обжига керамзита, структурная схема которого представлена на рисунке 2.1. Он включает в себя из вращающуюся печь *ВП*, газовую горелку *ГГ* и ленточный питатель *ЛП*; соответственно их приводные асинхронные двигатели *АД1*, *АД2*, *АД3*; механические передачи *МП1*, *МП2*, *МП3*; управляемые силовые преобразователи *СПЧ1*, *СПЧ2*, *СПЧ3* и устройство управления *УУ*.

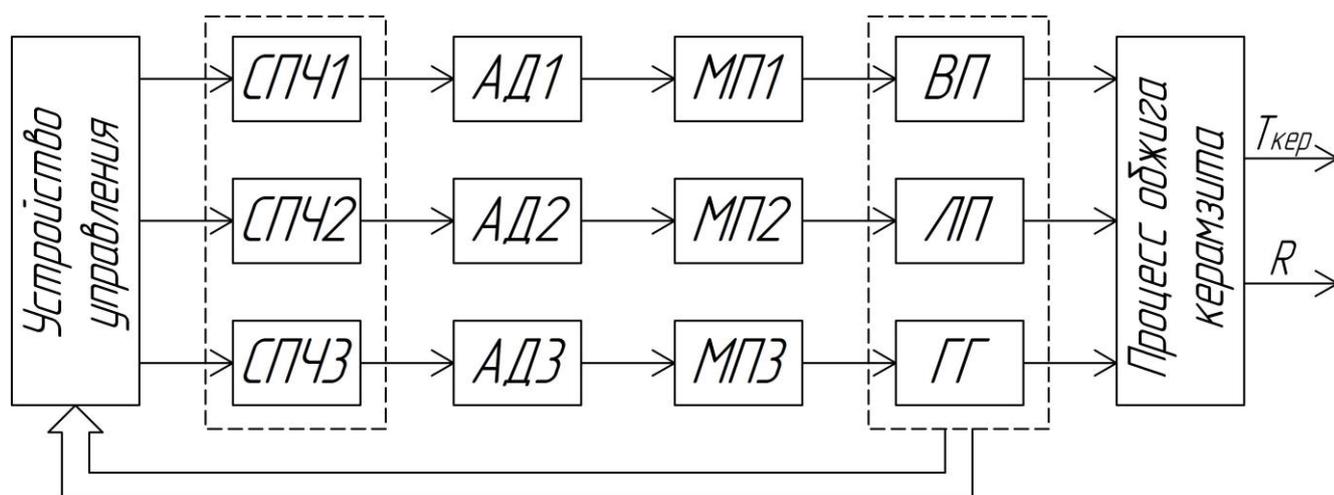


Рисунок 2.1 – Структурная схема технологического комплекса  
обжига керамзита

Производство керамзита заданной прочности в условиях сокращения энергозатрат может быть эффективно выполнено путём оснащения вращающейся печи соответствующим комплексом систем автоматического управления, для создания которого требуется разработка математического описания технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи как объекта управления.

Под объектом управления будем понимать технологический процесс обжига керамзита во вращающейся печи, который можно представить совокупностью теплофизических процессов, протекающих при обжиге керамзита, и электромеханических процессов в исполнительных электроприводах вращающейся печи, ленточного питателя и горелки.

Состояние объекта управления определим вектором выходных координат  $\bar{X} = [T_F, T_A, T_C]^T$ , где  $T_F, T_A, T_C$  температура в сечениях F, A и C (рис. 1.3), соответственно, который, в рамках известных допущений, определяет прочность производимого керамзита. Вектором управляющих воздействий –  $\bar{U} = [\omega_{п}, q_з, Q_Г]^T$  (рис. 2.2) принимаются: скорость  $\omega_{п}$  вращения печи; величина загрузки  $q_з$  сырца керамзита, подаваемого в печь (определяется, например, скоростью ленточного питателя), тепловая мощность горелки  $Q_Г$  (величина которой регулируется приводами устройства управления подачей газа в горелку).

Возмущающими воздействиями на объект управления являются, в основном, влажность  $w$  сырца керамзита и изменение параметров его состава, а также изменение температуры атмосферного воздуха окружающего печь и подаваемого в горелку.



Рисунок 2.2 – Обобщённая структура процесса обжига как многомерного объекта управления

При разработке математического описания объекта управления введём ряд основных допущений.

1. Считаем, что химический и минералогический состав используемой глины для обжига керамзита остается неизменным, что соответствует добыче сырья из одного карьера.

2. При вращении печи (в процессе обжига керамзита), происходит постоянное перекачивание сырца керамзита, поэтому допускаем, что он распределён по всей внутренней поверхности печи слоем одной толщины.

3. Принимаем температуру сырца керамзита и дымовых газов в сечении  $z_i$  (рис. 2.3) неизменными.

4. Допускаем, что геометрия факела горелки (работающей на газообразном топливе) после проведённых подготовительных операций не регулируется.

5. Считаем постоянными температуру и состав атмосферного воздуха (окружающего печь) и топлива подаваемого в горелку.

6. Исследования [1] показали, что при перемещении дымовых газов в продольном направлении печи их скорость изменяют примешивающиеся газы, выделяемые из сырца керамзита в процессе обжига, при этом скорость дымовых газов изменяется всего на 5 – 10%. Поэтому допускаем, что их скорость в продольном направлении печи неизменна.

7. Скорость движения керамзита внутри печи составляет 0,5 м/мин, поэтому принимаем, что она постоянна по всей длине печи при ( $\omega_n = \text{const}$ ) и не влияет на температуру газового потока.

## **2.2 Математическое описание теплофизических процессов,**

### **протекающих во вращающейся печи при обжиге керамзита**

При решении поставленной задачи используем расчётную схему [10,34] вращающейся печи при производстве керамзита в виде трёхслойного цилиндра

(рис. 2.3), состоящего из стального корпуса 1, огнеупорного кирпича 2 (футеровки) и сырца керамзита 3, равномерно распределённого по внутренней поверхности футеровки. Ось  $z$  цилиндра наклонена к линии горизонта под углом  $\alpha$  (на рисунке не показано), что обеспечивает движение материала от загрузочного окна к выгрузке со скоростью  $v_M$ . Газовая горелка 6 образует пламя 5 и, тем самым, создаёт дымовые газы 4, которые движутся со скоростью  $v^{дг}$  навстречу материалу. В результате этого происходит обжиг керамзита, сопровождающийся передачей тепла от газов к керамзиту и стенкам печи и теплофизическими процессами в керамическом материале.

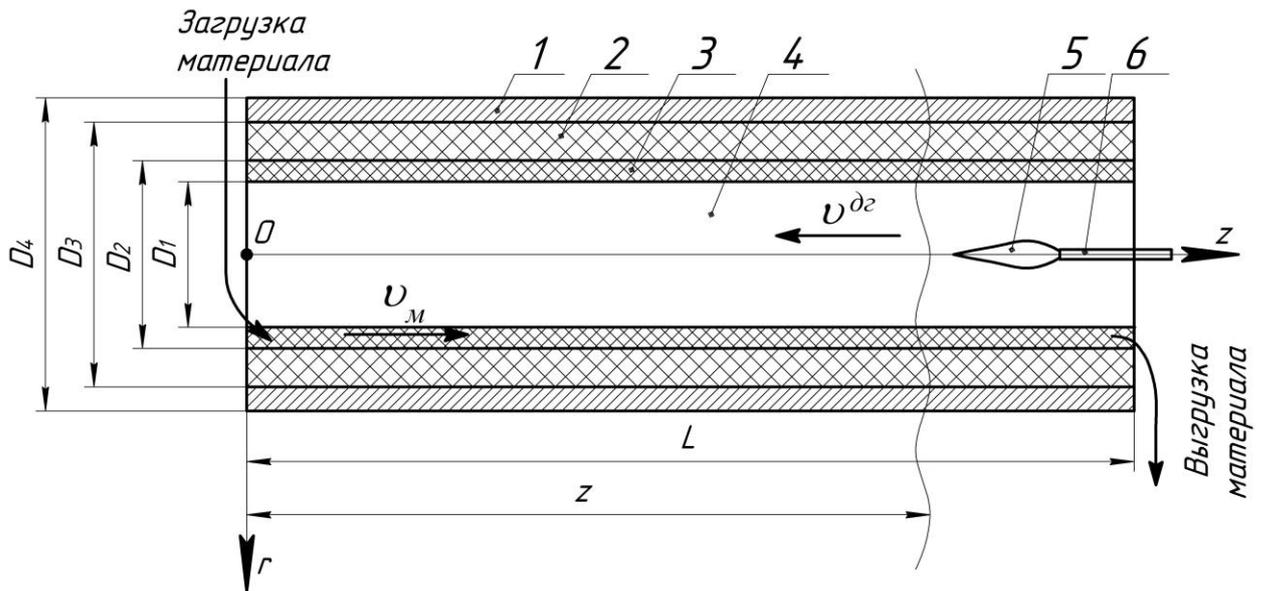


Рисунок 2.3 – Расчетная схема вращающейся печи

В качестве горелки может быть использована, например, горелка газовая, типа С 199-08-100 (рис. 2.4) [6,1,21,62], которая устанавливается в разгрузочной головке вращающейся печи. Внешний корпус горелки предназначен для подачи воздуха, а внутренний корпус — для подачи газа. Воздух в горелку подается из окружающей среды посредством вентилятора, газ — из газовой магистрали, расход определяется регулирующими устройствами. Паспортные характеристики горелки приведены в таблице 2.1 [6,1,21].

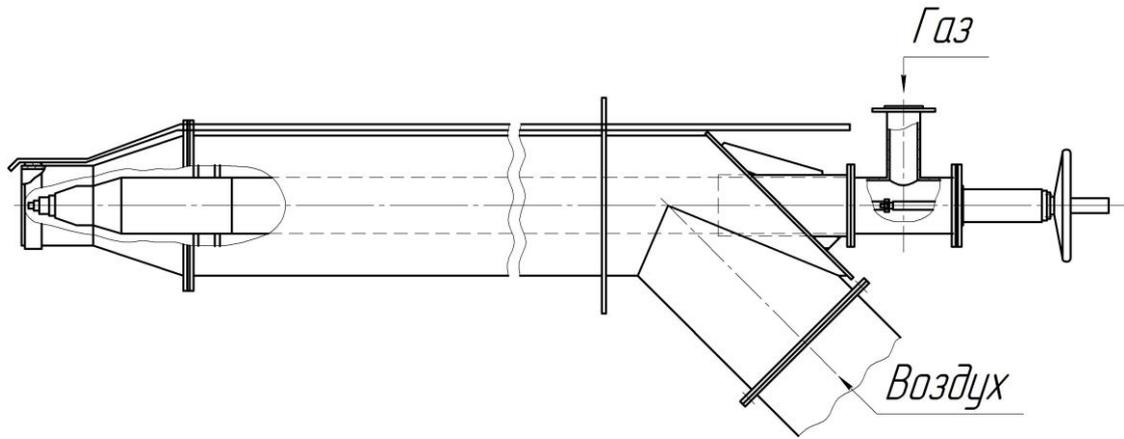


Рисунок 2.4 – Устройство газовой горелки С 199-08-100

Таблица 2.1 – Технические характеристики горелки

№	Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра
1	Расход газа	м <sup>3</sup> /час	800
2	Давление газа перед горелкой	Па	3000
3	Давление воздуха перед горелкой	Па	1600
4	Тепловая мощность	МВт	7-9,3
5	Основные размеры длина диаметр	мм	4460 430
6	Масса	кг	725

Объёмная тепловая мощность  $Q_{\Gamma}$  горелки, передаваемая топочному пространству вращающейся печи, определяется согласно [6] следующим выражением:

$$Q_{\Gamma} = \frac{W_{\Gamma}}{V_{\Pi}}, \quad (2.1)$$

где  $V_{\Pi}$  – внутренний объём топочного пространства вращающейся печи,  $W_{\Gamma} = Q_{\Gamma} \cdot Q_{\text{н}}$  – тепловая мощность горелки;  $Q_{\Gamma}$  – расход топлива (газа),  $Q_{\text{н}}$  – теплотворность топлива, тогда коэффициент передачи горелки будет определяться, как:

$$K_{\Gamma} = \frac{\Delta Q_{\Gamma}}{\Delta Q_{\Gamma}}, \quad (2.2)$$

где  $\Delta Q_{\Gamma}$  – приращение объёмной тепловой мощности,  $\Delta Q_{\Gamma}$  – приращение расхода топлива.

Математическое описание вращающейся печи как объекта управления включает в себя модель термодинамики газовой среды (дымовых газов) и теплопередачи в твёрдом теле (слоями вращающейся печи и керамзитом), а также модели исполнительных электроприводов вращающейся печи, ленточного питателя и горелки.

Термодинамику дымовых газов можно описать следующей системой уравнений [63-66]:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial v_r^{дг}}{\partial \tau} + v_r^{дг} \frac{\partial v_r^{дг}}{\partial r} + v_z^{дг} \frac{\partial v_r^{дг}}{\partial z} + \frac{1}{\rho^{дг}} \cdot \frac{\partial p^{дг}}{\partial r} = -bv_z^{дг} + \\
 & + \frac{\mu^{дг}}{\rho^{дг}} \left( \frac{\partial^2 v_r^{дг}}{\partial r^2} + \frac{3}{4} \cdot \frac{\partial^2 v_z^{дг}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_r^{дг}}{\partial r} - \frac{v_r^{дг}}{r^2} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\partial^2 v_z^{дг}}{\partial r \partial z} \right), \\
 & \frac{\partial v_z^{дг}}{\partial \tau} + v_r^{дг} \frac{\partial v_z^{дг}}{\partial r} + v_z^{дг} \frac{\partial v_z^{дг}}{\partial z} + \frac{1}{\rho^{дг}} \cdot \frac{\partial p^{дг}}{\partial z} = bv_r^{дг} - g + \\
 & + \frac{\mu^{дг}}{\rho^{дг}} \left( \frac{3}{4} \cdot \frac{\partial^2 v_z^{дг}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z^{дг}}{\partial z^2} + \frac{3}{4r} \cdot \frac{\partial v_z^{дг}}{\partial r} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\partial^2 v_r^{дг}}{\partial r \partial z} + \frac{1}{4r} \cdot \frac{\partial v_r^{дг}}{\partial z} \right), \\
 & \frac{\partial p^{дг}}{\partial \tau} + v_r^{дг} \frac{\partial p^{дг}}{\partial r} + v_z^{дг} \frac{\partial p^{дг}}{\partial z} + \rho^{дг} \left( \frac{\partial v_r^{дг}}{\partial r} + \frac{v_r^{дг}}{r} + \frac{\partial v_z^{дг}}{\partial z} \right) = 0, \\
 & \frac{\partial T^{дг}}{\partial \tau} + v_r^{дг} \frac{\partial T^{дг}}{\partial r} + v_z^{дг} \frac{\partial T^{дг}}{\partial z} + T^{дг} \left( \frac{\partial v_r^{дг}}{\partial r} + \frac{v_r^{дг}}{r} + \frac{\partial v_z^{дг}}{\partial z} \right) = \frac{\lambda^{дг}}{c_p^{дг} \rho^{дг}} \left( \frac{\partial^2 T^{дг}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T^{дг}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T^{дг}}{\partial r} \right) + \\
 & + \frac{\lambda^{дг}}{c_p^{дг} 2\rho^{дг}} \left[ \left( \frac{\partial v_r^{дг}}{\partial r} - \frac{v_r^{дг}}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_r^{дг}}{\partial r} - \frac{\partial v_z^{дг}}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{v_r^{дг}}{r} - \frac{\partial v_z^{дг}}{\partial z} \right)^2 + \frac{3}{2} \left( \frac{\partial v_r^{дг}}{\partial z} + \frac{\partial v_z^{дг}}{\partial r} \right)^2 \right] + Q_r(\tau). \\
 & p^{дг} - \rho^{дг} RT^{дг} = 0, \\
 & \mu^{дг} = f(T^{дг})
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

где первые два уравнения – уравнения Навье – Стокса (закон сохранения импульса); третье – уравнение неразрывности (закон сохранения массы); четвёртое – уравнение сохранения энергии; пятое – уравнение термодинамического состояния и шестое – эмпирическая зависимость коэффициента вязкости от температуры. Здесь  $v^{дг}$ ,  $p^{дг}$ ,  $\rho^{дг}$ ,  $T^{дг}$ ,  $\lambda^{дг}$ ,  $c_p^{дг}$ ,  $\mu^{дг}$  – скорость, давление, плотность, коэффициент теплопроводности, температура, удельная теплоёмкость (при постоянном давлении) и коэффициент вязкости дымовых газов;  $\tau$  – время;  $b$  и  $g$  – составляющие векторов ускорения силы тяжести и Кориолиса соответственно.

Поскольку движение дымовых газов носит турбулентный характер, то для численного метода решения, уравнения движения и энергии в системе (2.3) осредняются по Рейнольдсу, а сама система дополняется уравнениями в рамках  $k-\varepsilon$  модели [63,64,67] и принимает вид:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{\partial \overline{\rho^{др}}}{\partial x} &= \overline{\rho^{др}} X + \frac{\partial}{\partial x} (\overline{\tau_{xx}} - \overline{v_x^{др} m_x^{др}}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\tau_{xy}} - \overline{v_y^{др} m_x^{др}}) + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\tau_{xz}} - \overline{v_z^{др} m_x^{др}}) - \frac{\partial \overline{m_x^{др}}}{\partial t}, \\
\frac{\partial \overline{\rho^{др}}}{\partial y} &= \overline{\rho^{др}} Y + \frac{\partial}{\partial x} (\overline{\tau_{yx}} - \overline{v_x^{др} m_y^{др}}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\tau_{yy}} - \overline{v_y^{др} m_y^{др}}) + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\tau_{yz}} - \overline{v_z^{др} m_y^{др}}) - \frac{\partial \overline{m_y^{др}}}{\partial t}, \\
\frac{\partial \overline{\rho^{др}}}{\partial z} &= \overline{\rho^{др}} Z + \frac{\partial}{\partial x} (\overline{\tau_{zx}} - \overline{v_x^{др} m_z^{др}}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{\tau_{zy}} - \overline{v_y^{др} m_z^{др}}) + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\tau_{zz}} - \overline{v_z^{др} m_z^{др}}) - \frac{\partial \overline{m_z^{др}}}{\partial t}, \\
\frac{\partial \overline{\rho^{др}}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{m_x^{др}}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{m_y^{др}}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{m_z^{др}}}{\partial z} &= 0, \\
\rho^{др} c_p^{др} \frac{D\Gamma^{др}}{D\tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda^{др} \frac{\partial \Gamma^{др}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda^{др} \frac{\partial \Gamma^{др}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda^{др} \frac{\partial \Gamma^{др}}{\partial z} \right) + \mu^{др} \Phi + Q_r(\tau) \\
\frac{\partial (\rho^{др} k)}{\partial \tau} + \nabla (\rho^{др} v k) &= \nabla \left[ \left( \mu^{др} + \frac{\mu_t^{др}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \mu_t^{др} G - \rho^{др} \varepsilon \\
\frac{\partial (\rho^{др} \varepsilon)}{\partial \tau} + \nabla (\rho^{др} v \varepsilon) &= \nabla \left[ \left( \mu^{др} + \frac{\mu_t^{др}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t^{др} G - C_2 f_1 \rho^{др} \frac{\varepsilon^2}{k},
\end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

где  $X, Y, Z$  – проекции массовой силы дымовых газов, отнесенной к единице объёма;  $\frac{D\Gamma^{др}}{D\tau}$  – субстанциальная производная температуры;  $\Phi$  – диссипативная функция (рассеивания),

$$\Phi = 2 \left[ \left( \frac{\partial v_x^{др}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_y^{др}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z^{др}}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial v_y^{др}}{\partial x} + \frac{\partial v_x^{др}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z^{др}}{\partial y} + \frac{\partial v_y^{др}}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x^{др}}{\partial z} + \frac{\partial v_z^{др}}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial v_x^{др}}{\partial x} + \frac{\partial v_y^{др}}{\partial y} + \frac{\partial v_z^{др}}{\partial z} \right)^2;$$

$Q(\tau)$  – объемная тепловая мощность горелки;  $R$  – газовая постоянная;  $m$  – вектор количества движения  $m_x^{др} = \rho^{др} v_x^{др}$ ;  $m_y^{др} = \rho^{др} v_y^{др}$ ;  $m_z^{др} = \rho^{др} v_z^{др}$ ,  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $\varepsilon, G$  – диссипация и генерация кинетической энергии турбулентности соответственно,  $\mu_t^{др} = C_\mu \rho^{др} k^2 / \varepsilon$  – турбулентная динамическая вязкость,  $\sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1,3$  – «числа Прандтля»,  $C_1 = 1,44, C_2 = 1,92, C_\mu = 0,09$  – эмпирические константы модели турбулентности,  $f_1 = 1$  – функция низкорейнольдсовых моделей.

Уравнения (2.4) можно перевести в цилиндрическую систему координат с помощью известных формул преобразования [68].

Математическое описание теплопередачи в твёрдом теле, в частности – между слоями вращающейся печи и керамзитом, согласно [10,34] состоит из следующих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_M(z, r, \tau, w)}{\partial \tau} &= a_M(z) \left( \frac{\partial^2 T_M(z, r, \tau, w)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_M(z, r, \tau, w)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_M(z, r, \tau, w)}{\partial z^2} \right) - v_M \frac{\partial T_M(z, r, \tau, w)}{\partial z}, \\ \frac{\partial T_\phi(z, r, \tau)}{\partial \tau} &= a_\phi \left( \frac{\partial^2 T_\phi(z, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_\phi(z, r, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_\phi(z, r, \tau)}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial T_{ct}(z, r, \tau)}{\partial \tau} &= a_{ct} \left( \frac{\partial^2 T_{ct}(z, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{ct}(z, r, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{ct}(z, r, \tau)}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \right\} (2.5)$$

Первое уравнение системы (2.5) описывает теплопередачу материала (сырца керамзита), второе – футеровки, третье – корпуса, где  $T_M$ ,  $a_M$ ,  $v_M$  – температура, коэффициент теплопередачи и скорость материала, соответственно;  $v_M = f(\omega_{п})$ ;  $T_\phi$ ,  $a_\phi$ ;  $T_{ct}$ ,  $a_{ct}$  – температура и коэффициент теплопередачи футеровки и стальной стенки печи, соответственно.

Объединив системы уравнений (2.3) и (2.5) получим полное математическое описание объекта управления:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_r^{пр}}{\partial \tau} + v_r^{пр} \frac{\partial v_r^{пр}}{\partial r} + v_z^{пр} \frac{\partial v_r^{пр}}{\partial z} + \frac{1}{\rho^{пр}} \cdot \frac{\partial p^{пр}}{\partial r} &= -b v_z^{пр} + \\ + \frac{\mu^{пр}}{\rho^{пр}} \left( \frac{\partial^2 v_r^{пр}}{\partial r^2} + \frac{3}{4} \cdot \frac{\partial^2 v_z^{пр}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v_r^{пр}}{\partial r} - \frac{v_r^{пр}}{r^2} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\partial^2 v_z^{пр}}{\partial r \partial z} \right), \\ \frac{\partial v_z^{пр}}{\partial \tau} + v_r^{пр} \frac{\partial v_z^{пр}}{\partial r} + v_z^{пр} \frac{\partial v_z^{пр}}{\partial z} + \frac{1}{\rho^{пр}} \cdot \frac{\partial p^{пр}}{\partial z} &= b v_r^{пр} - g + \\ + \frac{\mu^{пр}}{\rho^{пр}} \left( \frac{3}{4} \cdot \frac{\partial^2 v_z^{пр}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z^{пр}}{\partial z^2} + \frac{3}{4r} \cdot \frac{\partial v_z^{пр}}{\partial r} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\partial^2 v_r^{пр}}{\partial r \partial z} + \frac{1}{4r} \cdot \frac{\partial v_r^{пр}}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial \rho^{пр}}{\partial \tau} + v_r^{пр} \frac{\partial \rho^{пр}}{\partial r} + v_z^{пр} \frac{\partial \rho^{пр}}{\partial z} + \rho^{пр} \left( \frac{\partial v_r^{пр}}{\partial r} + \frac{v_r^{пр}}{r} + \frac{\partial v_z^{пр}}{\partial z} \right) &= 0, \\ \frac{\partial T^{пр}}{\partial \tau} + v_r^{пр} \frac{\partial T^{пр}}{\partial r} + v_z^{пр} \frac{\partial T^{пр}}{\partial z} + T^{пр} \left( \frac{\partial v_r^{пр}}{\partial r} + \frac{v_r^{пр}}{r} + \frac{\partial v_z^{пр}}{\partial z} \right) &= \frac{\lambda^{пр}}{c_p^{пр} \rho^{пр}} \left( \frac{\partial^2 T^{пр}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T^{пр}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T^{пр}}{\partial r} \right) + \\ + \frac{\lambda^{пр}}{c_p^{пр} 2\rho^{пр}} \left[ \left( \frac{\partial v_r^{пр}}{\partial r} - \frac{v_r^{пр}}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_r^{пр}}{\partial r} - \frac{\partial v_z^{пр}}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{v_r^{пр}}{r} - \frac{\partial v_z^{пр}}{\partial z} \right)^2 + \frac{3}{2} \left( \frac{\partial v_r^{пр}}{\partial z} + \frac{\partial v_z^{пр}}{\partial r} \right)^2 \right] + Q_r(\tau). \\ p^{пр} - \rho^{пр} R T^{пр} &= 0, \\ \mu^{пр} &= f(T^{пр}), \\ \frac{\partial T_M(z, r, \tau, w)}{\partial \tau} &= a_M(z) \left( \frac{\partial^2 T_M(z, r, \tau, w)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_M(z, r, \tau, w)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_M(z, r, \tau, w)}{\partial z^2} \right) - v_M \frac{\partial T_M(z, r, \tau, w)}{\partial z}, \\ \frac{\partial T_\phi(z, r, \tau)}{\partial \tau} &= a_\phi \left( \frac{\partial^2 T_\phi(z, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_\phi(z, r, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_\phi(z, r, \tau)}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial T_{ct}(z, r, \tau)}{\partial \tau} &= a_{ct} \left( \frac{\partial^2 T_{ct}(z, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{ct}(z, r, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{ct}(z, r, \tau)}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \right\} (2.6)$$

Для решения системы уравнений (2.6) сформулируем начальные и граничные условия. При формировании краевых условий используем расчётную схему (рис. 2.5) [10,34].

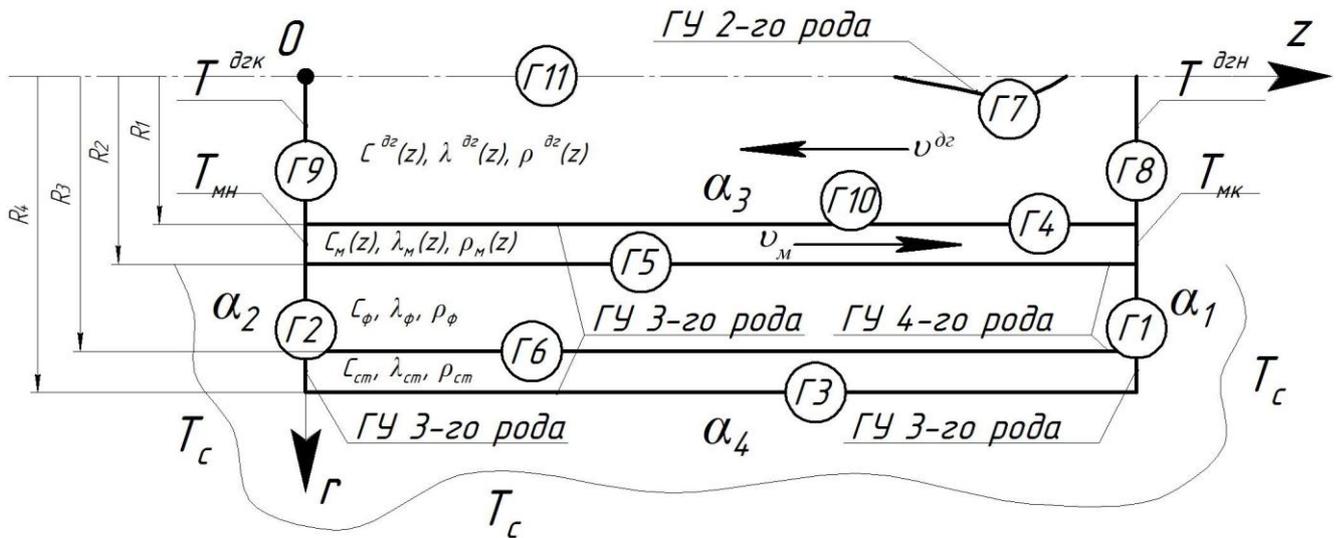


Рисунок 2.5 – Схема граничных условий

При определении начальных условий рассматриваем начальный момент вывода печи на технологический процесс обжига. Поэтому линейная скорость движения дымовых газов и материала (сырца) соответственно:

$$\left. \begin{aligned} v_z^{\text{дг}}(z,0) &= 0, \\ v_r^{\text{дг}}(r,0) &= 0, r \in [0; R_1] \\ T^{\text{дг}}(z,r,0) &= T_{\text{ср}}, r \in [0; R_1] \\ \rho^{\text{дг}}(z,r,0) &= \rho_0^{\text{дг}}, r \in [0; R_1], \\ T_{\text{м}}(z,r,0) &= T_{\text{ср}}, r \in [R_1; R_2], \\ T_{\text{ф}}(z,r,0) &= T_{\text{ср}}, r \in [R_2; R_3], \\ T_{\text{ст}}(z,r,0) &= T_{\text{ср}}, r \in [R_3; R_4], \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

где 1-ое и 2-ое уравнения – линейная и радиальная скорость движения дымовых газов; 3-е уравнение – температура дымовых газов в печи равна температуре окружающей среды; уравнение 4 показывает соответствие плотности  $\rho^{\text{дг}}$ , начальной плотности при нормальных условиях; 5-ое – 7-ое уравнения показывают соответствие температур материала  $T_{\text{м}}$ , футеровки  $T_{\text{ф}}$  и стального корпуса печи  $T_{\text{ст}}$  – температуре окружающей среды  $T_{\text{с}}$ .

Граничные условия описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
(\Gamma 1) \left\{ \begin{aligned} \lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}(L, r, \tau)}{\partial z} &= \alpha_1 (T_c(\tau) - T_{\phi}(L, r, \tau)), r \in [R_2; R_3], \\ \lambda_{ct} \frac{\partial T_{ct}(L, r, \tau)}{\partial z} &= \alpha_1 (T_c(\tau) - T_{ct}(L, r, \tau)), r \in [R_3; R_4], \\ \lambda_M \frac{\partial T_M(L, r, \tau)}{\partial z} &= \alpha_1 (T_c(\tau) - T_M(L, r, \tau)), r \in [R_1; R_2], \end{aligned} \right. \\
(\Gamma 2) \left\{ \begin{aligned} \lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}(0, r, \tau)}{\partial z} &= \alpha_2 (T_c(\tau) - T_{\phi}(0, r, \tau)), r \in [R_2; R_3], \\ \lambda_{ct} \frac{\partial T_{ct}(0, r, \tau)}{\partial z} &= \alpha_2 (T_c(\tau) - T_{ct}(0, r, \tau)), r \in [R_3; R_4], \\ \lambda_M \frac{\partial T_M(0, r, \tau)}{\partial z} &= \alpha_2 (T_c(\tau) - T_M(0, r, \tau)), r \in [R_1; R_2], \end{aligned} \right. \\
(\Gamma 3) \lambda_{ct} \frac{\partial T_{ct}(z, R_4, \tau)}{\partial r} &= \alpha_4 (T_c(z, R_4 - \Delta R, \tau) - T_{ct}(z, R_4, \tau)), z \in [0; L], \\
(\Gamma 4) \lambda_M \frac{\partial T_M(z, R_1, \tau)}{\partial z} &= \alpha_{3.конт.} (T_{др}(z, R_1 - \Delta R, \tau) - T_M(z, R_1, \tau)) + \\
&+ \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{др} \cdot \varepsilon_M (T_{др}^4(z, R_1 - \Delta R, \tau) - T_M^4(z, R_1, \tau))}{T_{др}(z, R_1 - \Delta R, \tau) - T_M(z, R_1, \tau)}, z \in [0; L], \\
(\Gamma 5) \lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}(z, R_2, \tau)}{\partial r} &= \lambda_M \frac{\partial T_M(z, R_2, \tau)}{\partial r}, z \in [0; L], \\
(\Gamma 6) \lambda_{ct} \frac{\partial T_{ct}(z, R_3, \tau)}{\partial r} &= \lambda_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}(z, R_3, \tau)}{\partial r}, z \in [0; L], \\
(\Gamma 7) Q_r(\tau) &= Q_r(z_r, r, \tau)|_{r=0}, z_r \in [2; 8M], \\
(\Gamma 8) \left\{ \begin{aligned} v_z^{др}(z, r, \tau)|_{z=L} &= 0, r \in [0; R_1], \\ v_r^{др}(z, r, \tau)|_{z=L} &= 0, r \in [0; R_1], \\ p^{др}(z, r)|_{z=L} &= p_a, r \in [0; R_1], \\ T^{др}(z, r, \tau)|_{z=L} &= T_{cp}, r \in [0; R_1], \end{aligned} \right. \\
(\Gamma 9) \left\{ \begin{aligned} v_z^{др}(z, r)|_{z=0} &= \frac{Q_{dc}}{\pi \cdot R_1^2}, r \in [0; R_1], \\ \frac{\partial v_r^{др}(z, r, \tau)}{\partial r} \Big|_{z=0} &= 0, r \in [0; R_1], \\ \frac{\partial T^{др}(z, r, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \frac{\partial T^{др}(z, r, \tau)}{\partial r} \Big|_{z=0} = 0, r \in [0; R_1], \end{aligned} \right. \\
(\Gamma 10) \left\{ \begin{aligned} v_z^{др}(z, r, \tau)|_{r=R_1} &= 0, z \in [0; L], \\ v_r^{др}(z, r, \tau)|_{r=R_1} &= 0, z \in [0; L], \\ \frac{\partial p^{др}(z, r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R_1} &= 0, z \in [0; L], \end{aligned} \right. \\
(\Gamma 11) \left\{ \begin{aligned} v_r^{др}(z, r, \tau)|_{r=0} &= 0, z \in [0; L], \\ \frac{\partial v_z^{др}(z, r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=0} &= 0, z \in [0; L], \end{aligned} \right.
\end{aligned} \tag{2.8}$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\varepsilon_{дг}$  – степень черноты дымовых газов,  $\varepsilon_m$  – степень черноты обжигаемого керамзита;  $T_c$  – температура окружающей среды;  $R_1, R_2, R_3, R_4, \Delta R$  – радиусы границ раздела сред и материалов слоёв печи, и толщина пограничного слоя между ними соответственно;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  – коэффициенты теплоотдачи от твердой поверхности к газовой среде;  $\lambda_m, \lambda_f, \lambda_{ст}$  – коэффициенты теплопроводности;  $\rho_m, \rho_f, \rho_{ст}$  – плотности обжигаемого материала, футеровки и стального корпуса печи, соответственно;  $Q_{дс}$  – расход дымососа;  $p_a$  – атмосферное давление.

В системе (2.8) граничных условий выделим отдельные условия, а именно Г1 и Г2 – соответствуют теплопередаче между окружающей средой и поверхностью торцов печи стального кольца  $[R_4;R_3]$ , кольца футеровки  $[R_3;R_2]$ , сырца керамзита  $[R_2;R_1]$  соответственно, через коэффициенты теплопередачи  $\lambda_{ст}, \lambda_f, \lambda_m$ . Граница Г3 образуется внешней поверхностью корпуса печи с окружающей средой через коэффициент  $\lambda_{ст}$  по всей длине печи  $z \in [0;L]$ . Г4 – граница взаимодействия керамзита с дымовыми газами через коэффициент теплопередачи  $\lambda_m$   $z \in [0;L]$ . Границы Г5, Г6 образуются между поверхностями материала и футеровки  $\lambda_m, \lambda_f$  и поверхностями футеровки и внутренней стенки корпуса  $\lambda_f, \lambda_{ст}$ , соответственно. Граница Г7 разделяет источник тепла (объёмная тепловая мощность  $Q_r$  горелки передаётся через поверхность факела [10,34]) и дымовые газы. Границы Г8 и Г9 описывают величины давления  $p^{дг}$ , температуры  $T^{дг}$  и скорости  $v^{дг}$  (через расход  $Q_{дс}$  дымососа, создающего тягу [69]) дымовых газов на холодном и горячем торцах вращающейся печи соответственно. Составляющая скорости  $v_r^{дг}$  на границе Г10 показывает непроницаемость поверхности для газа, а  $v_z^{дг}$  и производная давления  $\frac{\partial p^{дг}}{\partial r}$ , что в вязком газе имеет место прилипание его частиц к поверхности сырца керамзита. Условия на границе Г11 показывают, что на оси вращающейся печи, в силу симметрии, отлична от нуля только составляющая скорости  $v_z^{дг}$ .

## 2.3 Математическое описание исполнительных электроприводов

### технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи

#### 2.3.1 Математическая модель электропривода ленточного питателя

Для регулирования загрузки вращающейся печи сырьем керамзита из бункера запаса служит ленточный питатель, предназначенный для выдачи мелкозернистых, мелкокусковых и крупнокусковых материалов при температурах до 100°C. Питатель представляет собой короткий ленточный транспортер с резиноканевой конвейерной лентой, огибающей приводной и натяжной барабаны, которые смонтированы на раме.

Над верхней ветвью ленты, лежащей на роликах или на неподвижном металлическом настиле, расположены стационарные борты. Сырец поступает на ленту непосредственно из бункера через воронку, соединенную фланцем с бункером. Производительность ленточного питателя определяется скоростью перемещения ленты, которая регулируется при помощи частотного преобразователя, и/или толщины слоя сырца керамзита, которая в свою очередь регулируется изменением положения шиберного затвора.

Конструкция питателя (рис. 2.6) включает в себя двигатель, редуктор и собственно питатель.

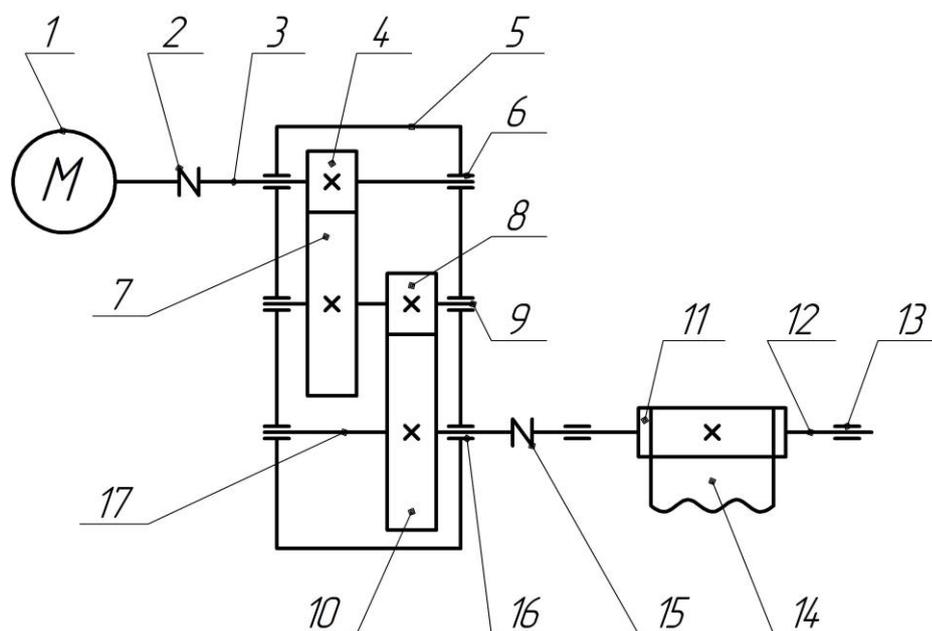


Рисунок 2.6 – Кинематическая схема ленточного питателя

На рисунке 2.6: 1 – электродвигатель; 2 – муфта упругая; 3 – вал быстроходный; 4 – вал-шестерня быстроходной ступени; 5 – корпус редуктора; 6 – подшипниковый узел с глухой крышкой; 7 – зубчатое колесо быстроходной ступени; 8 – вал-шестерня тихоходной ступени; 9 – вал-шестерня промежуточный; 10 – зубчатое колесо тихоходной ступени; 11 – барабан приводной ленточного конвейера; 12 – вал приводного барабана; 13 – опора подшипниковая приводного барабана; 14 – лента питателя; 15 – муфта упругая; 16 – подшипниковый узел со сквозной крышкой с уплотнением; 17 – вал тихоходный.

Асинхронный привод ленточного питателя имеет такую же динамику, как и типовой асинхронный привод, описываемый в соответствии с [70] известными уравнениями (2.9) и (2.10).

$$\left. \begin{aligned}
 &-(1 + T_1 \cdot p) \cdot i_{\mu\alpha} = \gamma^* \cdot \omega_1 - \frac{L_0}{L_1} \cdot i_{2\alpha} - T_1 \cdot \omega_1 \cdot i_{\mu\beta}, \\
 &-(1 + T_1 \cdot p) \cdot i_{\mu\beta} = \frac{L_0}{L_1} \cdot i_{2\beta} + T_1 \cdot \omega_1 \cdot i_{\mu\alpha}, \\
 &-(1 + T_2 \cdot p) \cdot i_{2\alpha} = T_{32} \cdot p \cdot i_{\mu\alpha} - (\omega_1 - \omega) \cdot T_{32} \cdot i_{\mu\beta} + (\omega_1 - \omega) \cdot T_2 \cdot i_{2\beta}, \\
 &(1 + T_2 \cdot p) \cdot i_{2\beta} = T_{32} \cdot p \cdot i_{\mu\beta} + (\omega_1 - \omega) \cdot T_{32} \cdot i_{\mu\alpha} + (\omega_1 - \omega) \cdot T_2 \cdot i_{2\alpha}, \\
 &M_{дв} = \frac{3}{2} \cdot p_{п} \cdot L_0 \cdot (i_{\mu\beta} \cdot i_{2\alpha} + i_{\mu\alpha} \cdot i_{2\beta}), \\
 &M_{дв} = J_{пр} p \cdot \omega_{дв} + M_{н}, \\
 &\omega = p_{п} \cdot \omega_{дв},
 \end{aligned} \right\} (2.9)$$

где  $\omega$  – угловая скорость приведенной машины;  $i_{2\alpha}$ ,  $i_{2\beta}$  – активная и реактивная составляющие тока роторной цепи соответственно;  $p_{п}$  – число пар полюсов;  $i_{\mu\alpha}$ ,  $i_{\mu\beta}$  – активная и реактивная составляющие намагничивающего тока соответственно;  $J_{пр}$  – момент инерции, приведенный к валу двигателя;  $M_{дв}$  – момент двигателя;  $L_0 = L_{12} \cdot 3/2$ ,  $L_1 = L_{1\sigma} + L_0$ ,  $L_2 = L_{2\sigma} + L_0$  – полные эквивалентные индуктивности главного потока, фаз статора и ротора,  $L_{1\sigma}$ ,  $L_{2\sigma}$  – индуктивности полей рассеяния;  $T_1 = L_1/r_1$ ,  $T_2 = \sigma \cdot L_2/r_2$ ,  $T_{32} = L_0/r_2$  – постоянные времени,  $r_1$ ,  $r_2$  – активные сопротивления обмоток статора и ротора,  $\sigma$  – коэффициент рассеяния;  $\omega_1$  – угловая частота питающего напряжения,  $\omega_{дв}$  – угловая скорость ротора двигателя,  $\gamma^* = \gamma_0/r_1$  – постоянный коэффициент,  $\gamma_0 = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\phi}}{p_{п} \omega_{дв}}$ .

При этом токи определяются из следующих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \overline{i_{1\beta}} &= \overline{i_{\mu\beta}} - \overline{i_{2\beta}} \cdot \frac{L_0}{L_1}, \\ \overline{i_{1\alpha}} &= \overline{i_{\mu\alpha}} - \overline{i_{2\alpha}} \cdot \frac{L_0}{L_1}, \\ \overline{i_1} &= \overline{i_{1\alpha}} + \overline{i_{1\beta}}, \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

где  $i_1$  – ток статора,  $i_{1\alpha}$ ,  $i_{1\beta}$  – активная и реактивная составляющая тока статорной цепи.

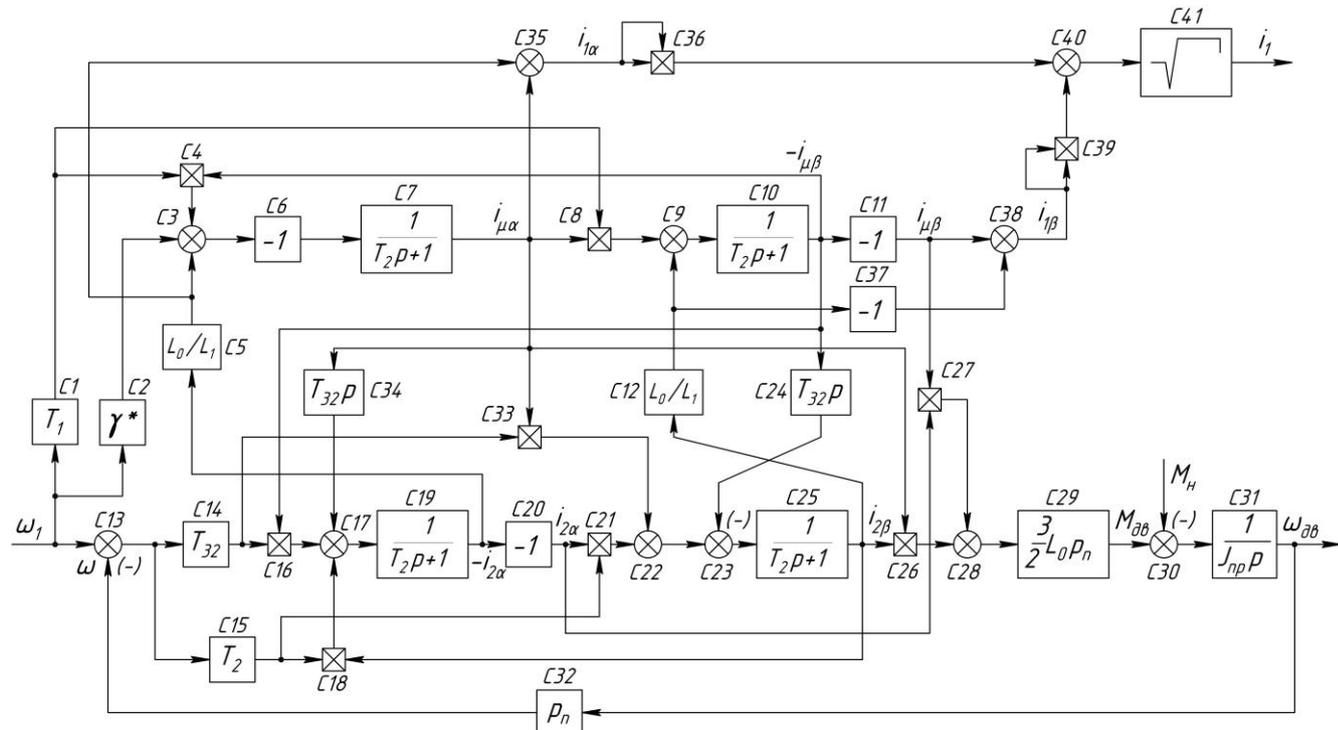


Рисунок 2.7 – Структурная схема нелинейной модели  
одномассового асинхронного привода

На основании систем уравнений (2.9) и (2.10) разработана структурная схема [70] одномассового асинхронного привода (рис. 2.7). Блоки С1-С7 моделируют первое уравнение, С8-С12 – второе уравнение системы (2.9), сумматор С13 выделяет разность  $(\omega_1 - \omega)$ . Блоками С14-С20 моделируется третье уравнение системы, а С21-С25, С33 – четвертое уравнение. Блоки С26-С29 формируют момент двигателя  $M_{дв}$  (пятое уравнение), а блоки С30-С31 – основное уравнение электропривода (шестое уравнение). С помощью пропорционального блока С32 формируется приведенная через число пар полюсов угловая скорость  $\omega$  машины. Блоки С35, С38 формируют проекции тока статора  $i_{1\alpha}$  и  $i_{1\beta}$ , соответственно. Блоки С36, С39, С40, С41 моделируют ток статора  $i_1$ .

Редуктор питателя представляет собой безынерционное звено [71]:

$$W_{ред1}(p) = \frac{\omega_{ред1}(p)}{\omega_{ад1}(p)} = K_{ред1}, \quad (2.11)$$

где  $\omega_{ад1}$ ,  $\omega_{ред1}$  – угловая скорость двигателя и выходного вала редуктора ленточного питателя соответственно,  $K_{ред1}$  – коэффициент передачи редуктора ленточного питателя.

В случае, когда расход  $q_3$  сырца керамзита определяется только лишь скоростью двигателя, транспортёр питателя будет описываться безынерционным звеном. Его производительность, в соответствии с [72-74], определяется по формуле:

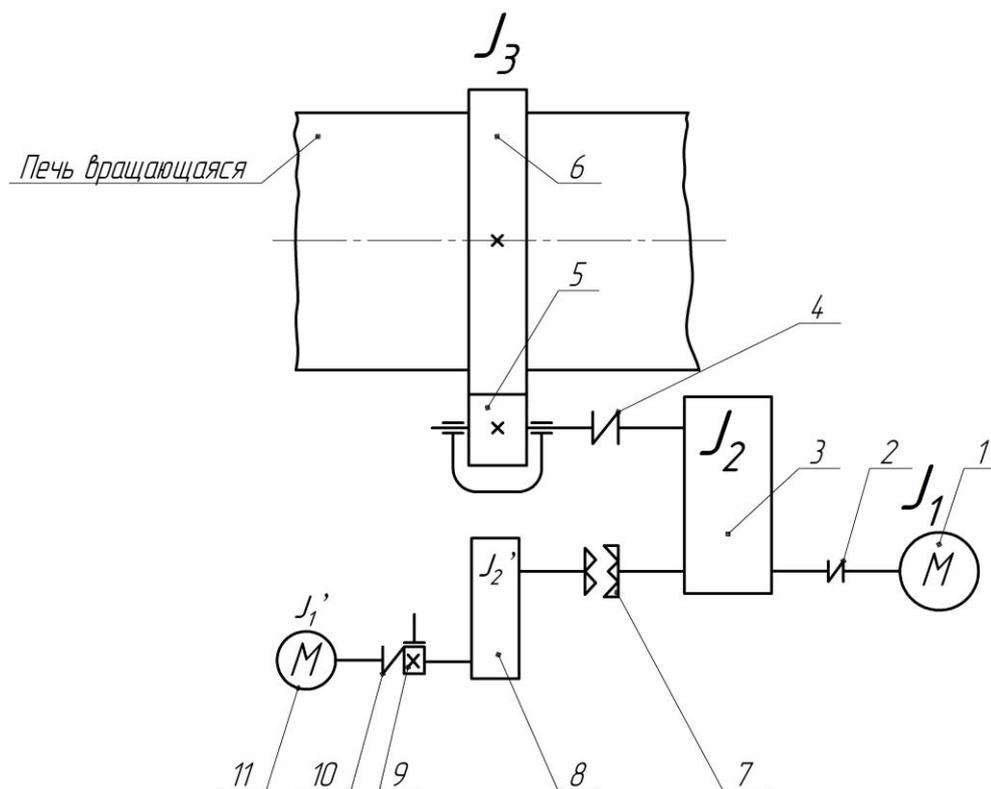
$$W_{лп}(p) = \frac{q_3(p)}{\omega_{ред1}(p)} = K_{лп}, \quad (2.12)$$

где  $K_{лп} = BhR_6$  – коэффициент передачи ленточного питателя,  $B$  – ширина ленты питателя,  $h$  – толщина слоя сырца керамзита на ленте,  $R_6$  – радиус приводного барабана ленточного питателя.

### **2.3.2 Математическая модель асинхронного трёхмассового электропривода вращающейся печи**

Известно, что реализация законов движения рабочего органа механизма, обеспечивающих выполнение требуемых технологических операций, является главной задачей автоматизированного электропривода. Несмотря на исключительное многообразие производственных механизмов, и технологических требований к электроприводу, важное место в решении этого вопроса занимает выполнение операций пуска и остановки электропривода, а в регулируемых электроприводах – перехода с одного технологического режима на другой, требующего изменения рабочей скорости [75]. Кинематическая схема привода

вращающейся печи представлена на рисунке 2.8. Если рассматривать представленный асинхронный привод как одномассовый, то динамика его описывается известными уравнениями (2.9) и (2.10) и представляет собой структуру (рис. 2.7) [70].



- 1 – главный электродвигатель; 2, 4, 10 – муфты упругие втулочно-пальцевые;  
 3 – главный редуктор; 5 – подвенцовая шестерня; 6 – венец зубчатый; 7 – муфта кулачковая; 8 – редуктор вспомогательный; 9 – тормоз колодочный;  
 11 – вспомогательный электродвигатель

Рисунок 2.8 – Кинематическая схема привода вращающейся печи

Приведённая система уравнений (2.9) и структура (рис. 2.7) не учитывают влияние упругих связей на работу вращающейся печи и механических передач. В процессе работы вращающейся печи возникающие колебания в системе могут привести к повышенному износу и даже поломке деталей механических передач, что вызовет необходимость остановки оборудования и внеплановый ремонт и, как следствие, снизить производительность вращающейся печи [76], поэтому необходимо учесть влияние упругих связей.

В действительности привод печи (рис. 2.8) представляет собой трёхмассовую электромеханическую систему с упругой связью между ними, обусловленную податливостью муфты и упругими деформациями шестерни и зубчатого венца. В соответствии с [77] разработана расчётная схема 3-х массовой системы главного привода (рис. 2.9) (для вспомогательного привода расчётная схема аналогичная, в этом случае редукторы 3 и 8, а также кулачковая муфта 7, могут рассматриваться как одна масса, поскольку кулачковая муфта не содержит упругих элементов). Она содержит три последовательно соединённых момента инерции  $J_1$ ,  $J_2$  и  $J_3$  двигателя, редуктора и вращающейся печи соответственно.

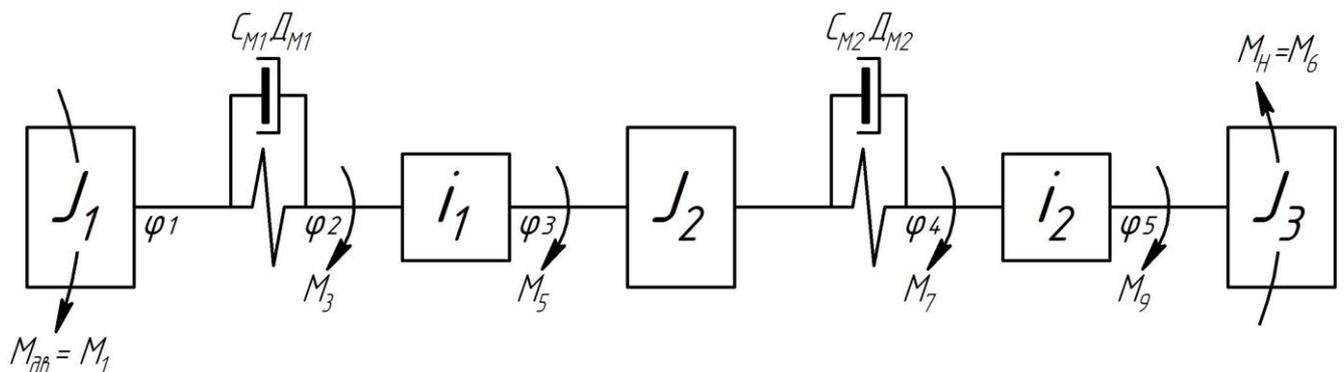


Рисунок 2.9 – Расчётная схема трёхмассовой системы главного асинхронного привода вращающейся печи

Звенья, соединяющие инерционные элементы (рис. 2.9), имеют передаточные числа  $i_1$  и  $i_2$ , а также обладают упруго-диссипативными свойствами, такими как коэффициенты крутильной жесткости  $C_{M1}$ ,  $C_{M2}$ , определяемые по [78] и коэффициенты демпфирования  $D_{M1}$ ,  $D_{M2}$ , определяемые по [79]. Для оценки возникающего в механической части привода момента в модель (рис. 2.9) введены в рассмотрение контрольные точки на входных и выходных валах редукторов, в которых наблюдаются соответствующие вращающие моменты  $M_3$ ,  $M_5$ ,  $M_7$  и  $M_9$ , возникающие под действием момента нагрузки  $M_н$ . Углы положения валов двигателя, муфт, редукторов определяются, через  $\varphi_1 \div \varphi_5$ . Углы скручивания муфт определяются через разности  $\varphi_{1,2}$  и  $\varphi_{3,4}$ .

Для полученной расчётной схемы (рис. 2.9) будет справедлива система уравнений [77]:

$$\left. \begin{aligned}
 M_{\text{дв}}(p) - J_1 p^2 \cdot \varphi_1(p) &= C_{m1}(T_{11}p + 1) \cdot \varphi_{1,2}(p); \\
 M_3(p) &= C_{m1}(T_{11}p + 1) \cdot \varphi_{1,2}(p) \\
 M_5(p) - J_2 p^2 \cdot \varphi_3(p) &= C_{m2}(T_{12}p + 1) \cdot \varphi_{3,4}(p); \\
 M_7(p) &= C_{m2}(T_{12}p + 1) \cdot \varphi_{3,4}(p); \\
 M_9(p) - J_3 p^2 \cdot \varphi_5(p) &= M_H(p); \\
 M_5(p) &= i_1 \cdot M_3(p); \\
 M_9(p) &= i_2 \cdot M_7(p); \\
 \varphi_2(p) &= i_1 \cdot \varphi_3(p); \\
 \varphi_4(p) &= i_2 \cdot \varphi_5(p); \\
 \varphi_{1,2}(p) &= \varphi_1(p) - \varphi_2(p); \\
 \varphi_{3,4}(p) &= \varphi_3(p) - \varphi_4(p);
 \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

где  $T_{11}$ ,  $T_{12}$  – постоянные времена,  $T_{11} = D_{m1}/C_{m1}$ ,  $T_{12} = D_{m2}/C_{m2}$ ;  $M_3(p)$ ,  $M_5(p)$ ,  $M_7(p)$ ,  $M_9(p)$  – изображения моментов.

Дополнив (2.9) уравнениями (2.13) получим систему уравнений, описывающую динамику трёхмассового асинхронного привода:

$$\left. \begin{aligned}
 -(1 + T_1 \cdot p) \cdot i_{\mu\alpha} &= \gamma^* \cdot \omega_1 - \frac{L_0}{L_1} \cdot i_{2\alpha} - T_1 \cdot \omega_1 \cdot i_{\mu\beta}, \\
 -(1 + T_1 \cdot p) \cdot i_{\mu\beta} &= \frac{L_0}{L_1} \cdot i_{2\beta} + T_1 \cdot \omega_1 \cdot i_{\mu\alpha}, \\
 -(1 + T_2 \cdot p) \cdot i_{2\alpha} &= T_{32} \cdot p \cdot i_{\mu\alpha} - (\omega_1 - \omega) \cdot T_{32} \cdot i_{\mu\beta} + (\omega_1 - \omega) \cdot T_2 \cdot i_{2\beta}, \\
 (1 + T_2 \cdot p) \cdot i_{2\beta} &= T_{32} \cdot p \cdot i_{\mu\beta} + (\omega_1 - \omega) \cdot T_{32} \cdot i_{\mu\alpha} + (\omega_1 - \omega) \cdot T_2 \cdot i_{2\alpha}, \\
 M_{\text{дв}} &= \frac{3}{2} \cdot p_{\text{п}} \cdot L_0 \cdot (i_{\mu\beta} \cdot i_{2\alpha} + i_{\mu\alpha} \cdot i_{2\beta}), \\
 M_{\text{дв}}(p) - J_1 p^2 \cdot \varphi_1(p) &= C_{m1}(T_{11}p + 1) \cdot \varphi_{1,2}(p), \\
 M_3(p) &= C_{m1}(T_{11}p + 1) \cdot \varphi_{1,2}(p), \\
 M_5(p) - J_2 p^2 \cdot \varphi_3(p) &= C_{m2}(T_{12}p + 1) \cdot \varphi_{3,4}(p), \\
 M_7(p) &= C_{m2}(T_{12}p + 1) \cdot \varphi_{3,4}(p), \\
 M_9(p) - J_3 p^2 \cdot \varphi_5(p) &= M_H(p), \\
 M_5(p) &= i_1 \cdot M_3(p), \\
 M_9(p) &= i_2 \cdot M_7(p), \\
 \varphi_2(p) &= i_1 \cdot \varphi_3(p), \\
 \varphi_4(p) &= i_2 \cdot \varphi_5(p), \\
 \omega &= p_{\text{п}} \cdot \omega_{\text{дв}}.
 \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Базируясь на структурной схеме (рис. 2.7), и дополнив её элементами [77], получим структурную схему нелинейной модели трёхмассового асинхронного привода (рис. 2.10).

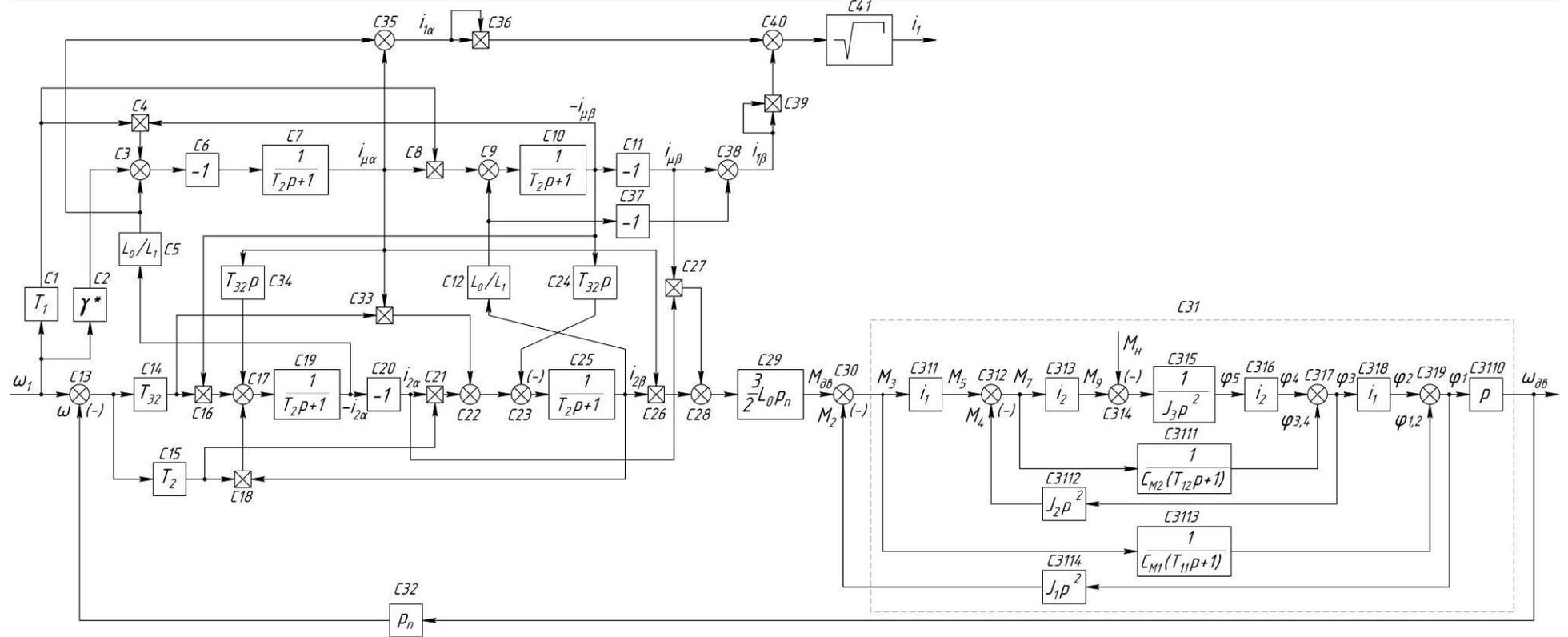
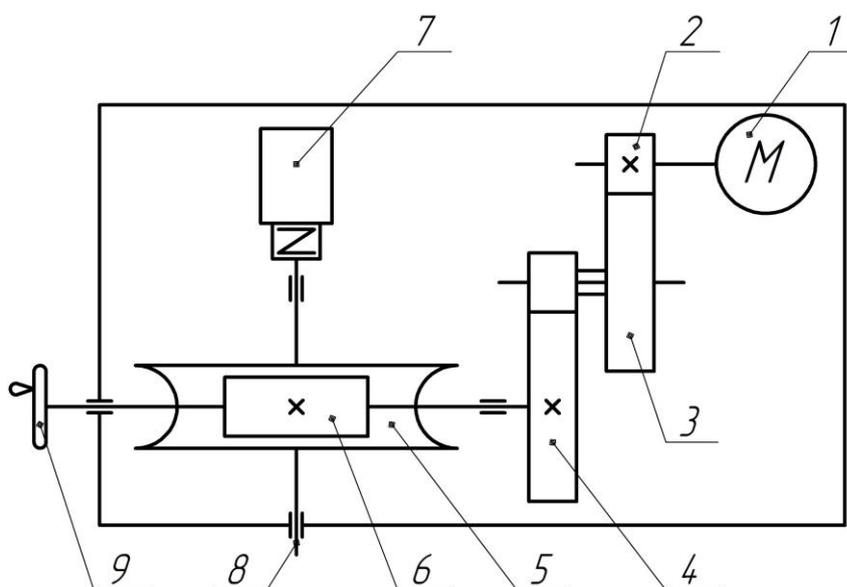


Рисунок 2.10 – Структурная схема нелинейной модели трёхмассового асинхронного привода

### 2.3.3 Математическая модель электропривода газовой горелки

Газовая горелка в соответствии с современными требованиями [80,81] оснащается типовой системой автоматики с плавным регулированием расхода газа и воздуха.

Работой горелки управляет контроллер. Он поддерживает заданную температуру под факелом горелки посредством управления заслонкой газа. Соотношение газ-воздух поддерживается при помощи воздушной заслонки путём изменения давления воздуха в зависимости от давления газа в горелке. Конструкция заслонки газовой с электроприводом (ЗГП) представляет собой совокупность механизма исполнительного электрического однооборотного (МЭО) и собственно заслонки. Кинематическая схема МЭО представлена на рисунке 2.11.



1 – электродвигатель, 2 – шестерня, 3 – блок - шестерня, 4 – колесо, 5 – червячное колесо, 6 – червяк, 7 – блок сигнализации положения, 8 – выходной вал, 9 – ручка

Рисунок 2.11 – Кинематическая схема электрического однооборотного исполнительного механизма

Динамика асинхронного привода ЗГП описывается известными уравнениями (2.9) и (2.10), и представляет собой структуру (рис. 2.7) [70].

Редуктор заслонки опишем передаточной функцией [71]:

$$W_{\text{ред2}}(p) = \frac{\alpha_{\text{ред2}}(p)}{\omega_{\text{ад2}}(p)} = \frac{K_{\text{ред2}}}{p}, \quad (2.15)$$

где  $\omega_{\text{ад2}}$  – угловая скорость двигателя заслонки горелки,  $K_{\text{ред2}}$  – коэффициент передачи редуктора заслонки.

Механизм заслонки – безынерционное звено [72-74]:

$$W_{\text{зав}}(p) = \frac{Q_{\text{г}}(p)}{\alpha_{\text{ред2}}(p)} = K_{\text{з}}, \quad (2.16)$$

где  $K_{\text{з}}$  – коэффициент передачи заслонки,  $Q_{\text{г}}$  – расход газа,  $\alpha_{\text{ред2}}$  – угол отпирания заслонки.

## 2.4 Температурно-прочностные характеристики процесса обжига

Для определения зависимости прочности от управляемого распределения температуры в печи в конкретных сечениях, т.е. области управляемости объекта, допуская, что желаемая кривая обжига может с достаточной степенью точности определяться значениями температуры  $T_k$  в сечениях F, A и C печи. С учётом анализа результатов экспериментальных исследований зависимости между температурой в зоне вспучивания и плотностью керамзита в куске (по фракциям) (рис. 2.12) [82] и между плотностью в куске, насыпной плотностью  $\rho$  керамзита, коэффициента вспучивания  $K_v$  глин и суглинков от температуры тепловой подготовки  $T_{тп}$  (рис. 1.1) [1,36] построена зависимость  $\rho = f(T_{всп})$  (рис. 2.13).

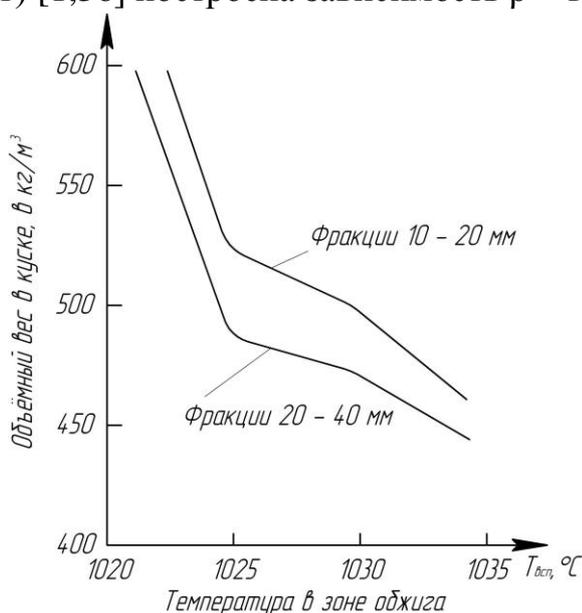


Рисунок 2.12 – Статическая зависимость объёмного веса керамзита от температуры вспучивания

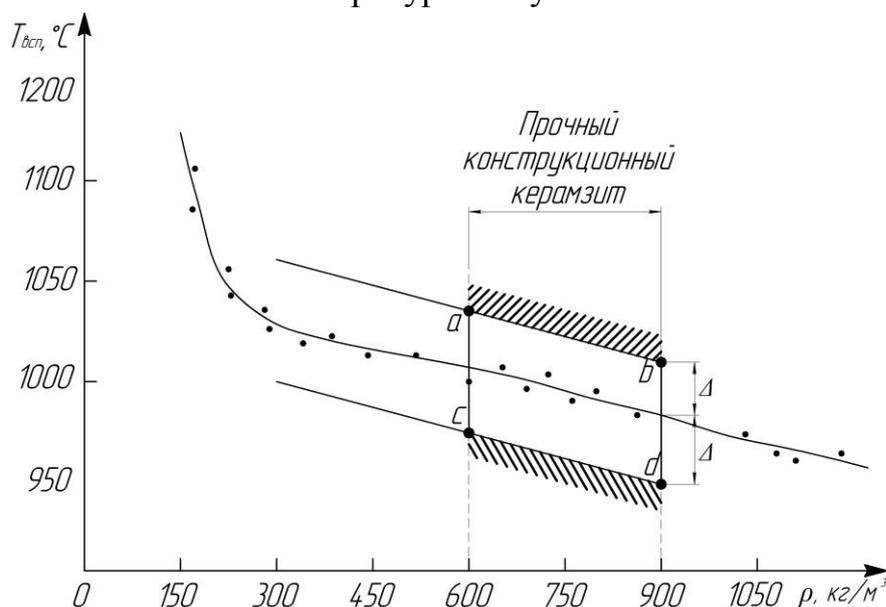


Рисунок 2.13 – Зависимость насыпной плотности керамзита от температуры в зоне вспучивания с ограничениями  $ab$  и  $cd$  для получения наиболее прочного керамзита,  $\Delta$  – погрешность стабилизации температуры

Связь между плотностью  $\rho$  и прочностью  $R$  керамзита может быть описана в виде квадратной параболы [57]:

$$R = A\rho^2, \quad (2.17)$$

где  $A$  – параметр керамзита,  $A = R_M / \rho_M^2$ , здесь  $R_M$  и  $\rho_M$  – значение прочности и плотности керамзита, его марок по насыпной плотности и прочности в соответствии с [42] (рис. 2.14). Анализ величины  $A$  показывает, что для лёгкого керамзита значения  $A$  примерно на 20-25% больше, чем для тяжёлого.

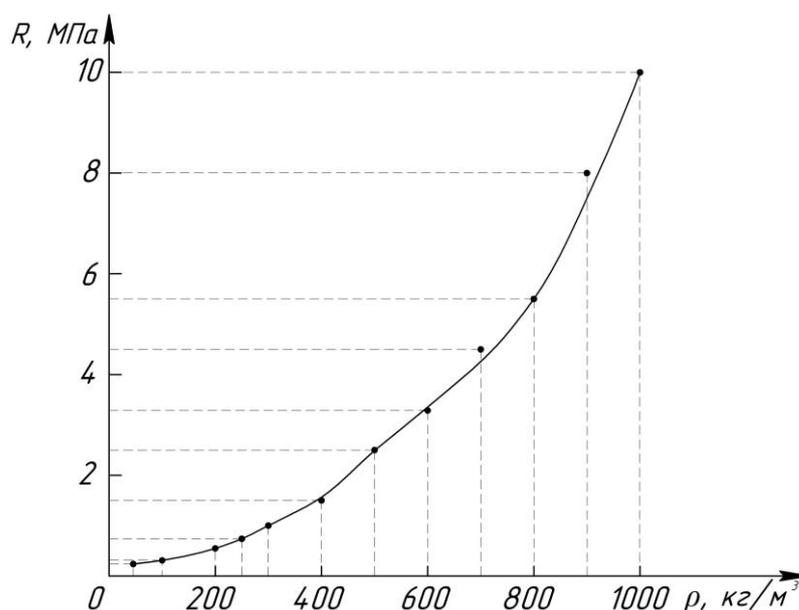
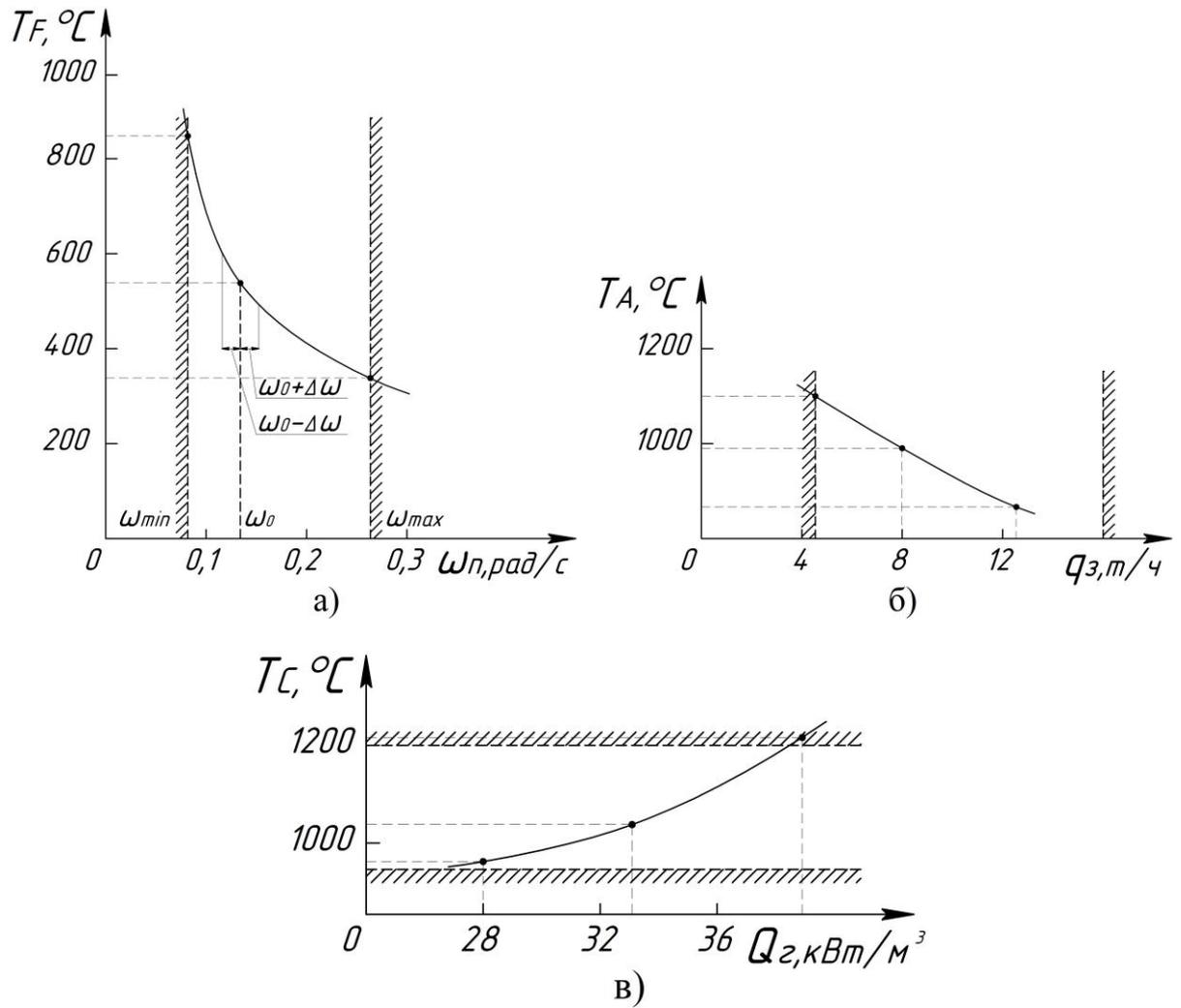


Рисунок 2.14 – Зависимость между плотностью  $\rho$  и прочностью  $R$  керамзита

Связь между температурами в сечениях  $F$ ,  $A$  и  $C$  и управляющими воздействиями  $\omega_n$ ,  $q_3$ ,  $Q_r$  установлена путём проведения численного моделирования (рис. 2.22) при вариации значений управляющих воздействий (табл. 2.2), (рис. 2.19). В результате обобщения полученных выше характеристик (рис. 2.12 – 2.14) и применения зависимости (2.17) построены статические характеристики в трёх сечениях  $F$ ,  $A$  и  $C$  (рис. 2.15) с линиями технологических ограничений.

Разработаны зависимости  $R = f_1(\omega_n)$ ,  $R = f_2(q_3)$ ,  $R = f_3(Q_r)$  (рис. 2.16), которые в последствии определяют область управляемости (рис. 2.19) процесса обжига керамзита с требуемой величиной прочности  $R_{тр}$  [47].

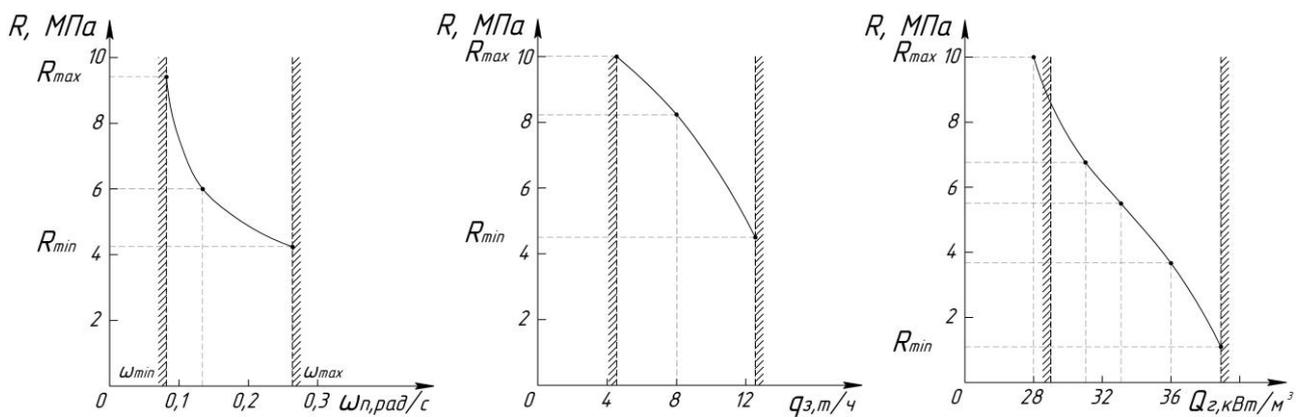


а) зависимость температуры  $T_F$  от скорости  $\omega_n$ ;

б) зависимость температуры  $T_A$  от загрузки  $q_3$ ;

в) зависимость температуры  $T_C$  от объёмной тепловой мощности горелки  $Q_2$

Рисунок 2.15 – Статические характеристики объекта управления



а) от скорости вращения  $\omega_n$  печи; б) от величины загрузки сырца  $q_3$  в печь;

в) от объёмной тепловой мощности горелки  $Q_2$

Рисунок 2.16 – Статические зависимости прочности  $R$  керамзита

*Методика построения прочностной характеристики*

При нахождении прочностной характеристики используем, как экспериментальные результаты (рис. 1.1, 2.12, 2.13), приведённые в работах [1,36,82], так и результаты, полученные путём численного моделирования на разработанной математической модели [34], где в качестве одной из выходных координат рассматривается параметр  $\rho$ .

На первом этапе анализируется множество  $\mathbf{K}$  кривых обжига керамзита, производимого из глины известного месторождения в условиях постоянства заданных значений  $\omega_{\text{п}}$ ,  $q_3$  и  $Q_{\text{Г}}$  (рис. 1.1). Считаем, что  $\mathbf{K}$  включает в себя  $m$  подмножеств  $\mathbf{k}_j$  ( $j \in 1, 2, \dots, m$ ), где  $m$  – число дискретных значений влажности  $w$  керамической массы из области её допустимых значений. Подмножество  $\mathbf{k}_j$  состоит из  $n$  кривых обжига, где каждая  $i$ -я кривая соответствует определённому значению насыпной плотности  $\rho_i$  керамзита. Этот анализ заключается в выявлении функциональных связей между значениями температуры керамзита в трёх опорных сечениях и насыпной плотности  $\rho$  (рис. 1.1, рис. 2.12, 2.13):

$$\rho = \begin{cases} f_1(T_{\text{F}}) \\ f_2(T_{\text{A}}) \\ f_3(T_{\text{C}}) \end{cases} \text{ при условии, что } w, \omega_{\text{п}}, q_3, Q_{\text{Г}} = \text{const.} \quad (2.18)$$

На втором этапе воспользуемся зависимостью (2.17) (рис. 2.14) и полученными зависимостями (рис. 2.15, 2.16). Это позволило представить связь между прочностью  $R$  и значениями  $T_{\text{F}}$ ,  $T_{\text{A}}$ ,  $T_{\text{C}}$ , например, в виде графических зависимостей (рис. 2.17), где штриховыми линиями показаны ограничения [43], обусловленные допустимым диапазоном скорости вращения печи (рис. 2.17,а), максимальной загрузкой печи (рис. 2.17,б) и физическими условиями обеспечения вспучиваемости керамзита (рис. 2.17,в).

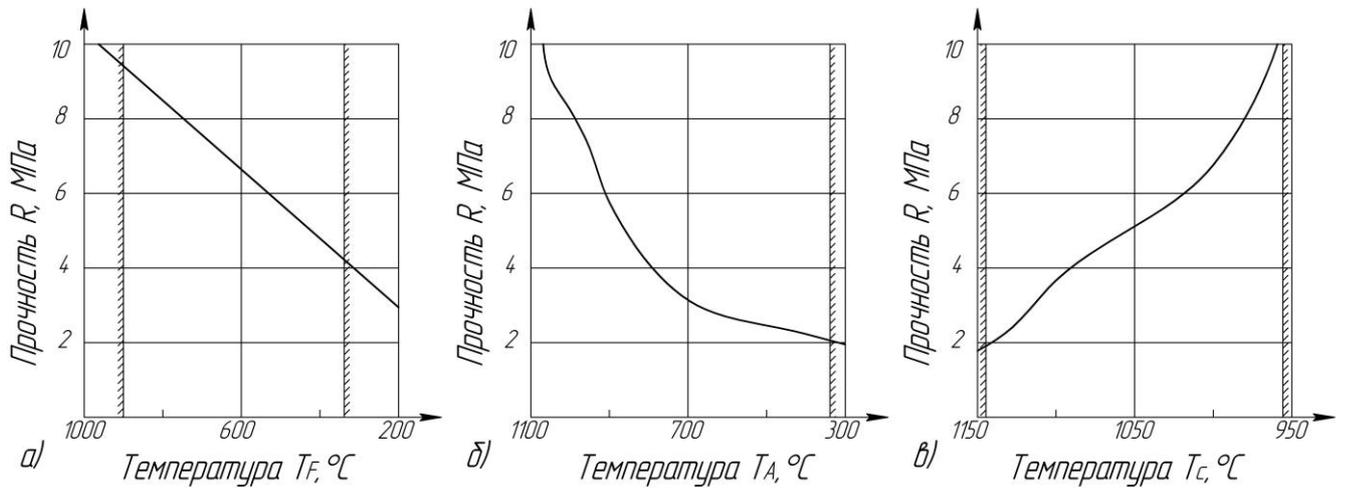


Рисунок 2.17 – Температурные режимы в опорных сечениях F, A и C

На третьем этапе введём в рассмотрение ортогональное пространство  $OT_F T_A T_C$ , в котором используем функциональные связи  $T_F$ ,  $T_A$ ,  $T_C$  с  $R$  (рис. 2.17), построим кривую

$$R = f_4 (T_F, T_A, T_C, w) \quad (2.19)$$

и оцифруем её известными значениями прочности  $R$  (рис. 2.18). Введём новое понятие и назовём зависимость (2.19) температурно-прочностной характеристикой (ТПХ) обжига керамзита, которая позволяет определить комплекс значений температуры в опорных точках, соответствующий требуемой величине  $R$  керамзита. Если дискретно изменять величину  $w$ , то в пространстве  $OT_F T_A T_C$  получим семейство ТПХ.

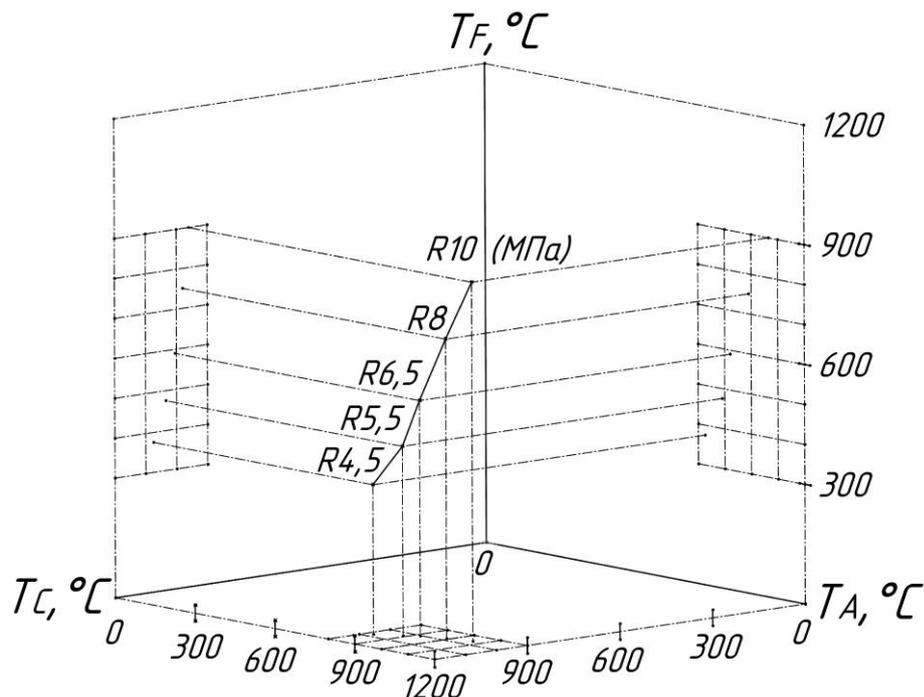


Рисунок 2.18 – Температурно-прочностная характеристика обжига керамзита

Введённое в рассмотрение ТПХ можно использовать, на наш взгляд, как при анализе эффективности применяемых режимов обжига керамзита (по величине отклонения температурных режимов в опорных сечениях от желаемой кривой обжига), так и в решении задач оптимизации производства керамзита с заданной величиной прочности при синтезе многомерных систем автоматического управления технологическим процессом обжига [33,59], в частности, при формировании вектора задающих сигналов.

## **2.5 Технологические ограничения и область существования процесса обжига при получении прочного керамзита**

Построим на плоскости  $OzT$  (рис. 2.19) область существования кривых обжига, соответствующую производству керамзита с прочностью в диапазоне  $R_{\min} - R_{\max}$  (рис. 2.16). Она представляет собой область управляемости процесса обжига керамзита с наложенными технологическими ограничениями. Известно [5], что вспучивание начинается при  $T_{C_{\min}} = 950^{\circ}\text{C}$ , поэтому построим отрезок  $C_H D_H$ , где сечение  $D$  – окончание зоны вспучивания и начало зоны охлаждения. Верхнее ограничение по температуре обусловлено расплавлением глины при  $T_C = 1200^{\circ}\text{C}$ , поэтому зададимся максимальной температурой вспучивания керамзита  $T_{C_{\max}} = 1150^{\circ}\text{C}$  и построим отрезок  $C_B D_B$ . В зоне охлаждения керамзит остывает до температуры  $800 - 900^{\circ}\text{C}$  [4] в сечении  $E$ , т.е.  $T_{E_H} = 800^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{E_B} = 900^{\circ}\text{C}$ , поэтому построим два отрезка  $D_H E_H$  и  $D_B E_B$ . Далее обозначим точками  $A_H$  и  $A_B$  минимальное и максимальное значение температур в конце зоны нагрева для получения марок по прочности керамзита П200 и П350, соответствующих  $R_{\min}$  и  $R_{\max}$  по температурно-прочностным характеристикам (рис. 2.17, 2.18) [36,83],  $T_{A_{\min}} = 800^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{A_{\max}} = 1070^{\circ}\text{C}$ . Точкой  $O_1$  обозначим начало зоны сушки, где температура сырца керамзита  $T_{O_1} = 100^{\circ}\text{C}$ . Из точки  $O_1$  проведём касательные  $O_1 M$  и  $O_1 N$  к предельным кривым обжига (они расположены в верхней и нижней части искомой области), ориентированным на производство керамзита с  $R_{\max}$  и  $R_{\min}$ , соответственно. Необходимым условием получения прочного керамзита является соблюдение производной  $\frac{dT}{dt}$  в диапазоне от 5 до  $45^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  [1,43],

поскольку при этом газовыделение суглинков (из которых производится прочный керамзит) находится в пределах от 3-4 до 5-8 мг/г, коэффициент вспучивания возрастает незначительно с 1,3-1,5 до 1,8-2, образуется однородный расплав, происходит формирование равномернопористой структуры материала с мелкими и мельчайшими закрытыми порами [1]. Проведём два луча  $A_H B_H$  и  $A_H N$  из точки  $A_H$  с тангенсом угла наклона  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{dT}{dz} = 45^\circ \text{C}$  (соответствующий скорости

вращения печи  $\omega_{\text{п}} = 0,26 \text{ рад/с}$ ) и луч  $C_H B_H$  из точки  $C_H$ , пересечение лучей  $A_H B_H$  и  $C_H B_H$  укажет положение точки  $B_H$ , а пересечение лучей  $A_H N$  и  $O_1 N$  – положение точки  $N$ . После проведём два луча  $A_B B_B$  и  $A_B M$  из точки  $A_B$  с тангенсом угла

наклона  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{dT}{dz} = 5^\circ \text{C}$  (соответствующий скорости вращения печи  $\omega_{\text{п}} = 0,08 \text{ рад/с}$ ) и луч  $C_B B_B$  из точки  $C_B$ , пересечение лучей  $A_B B_B$  и  $C_B B_B$  укажет положение точки  $B_B$ , а пересечение лучей  $A_B M$  и  $O_1 M$  – положение точки  $M$ . В результате получим область существования кривых обжига, которая ограничена ломанными сверху  $O_1 M B_B D_B E_B$  и снизу  $O_1 N B_H D_H E_H$ .

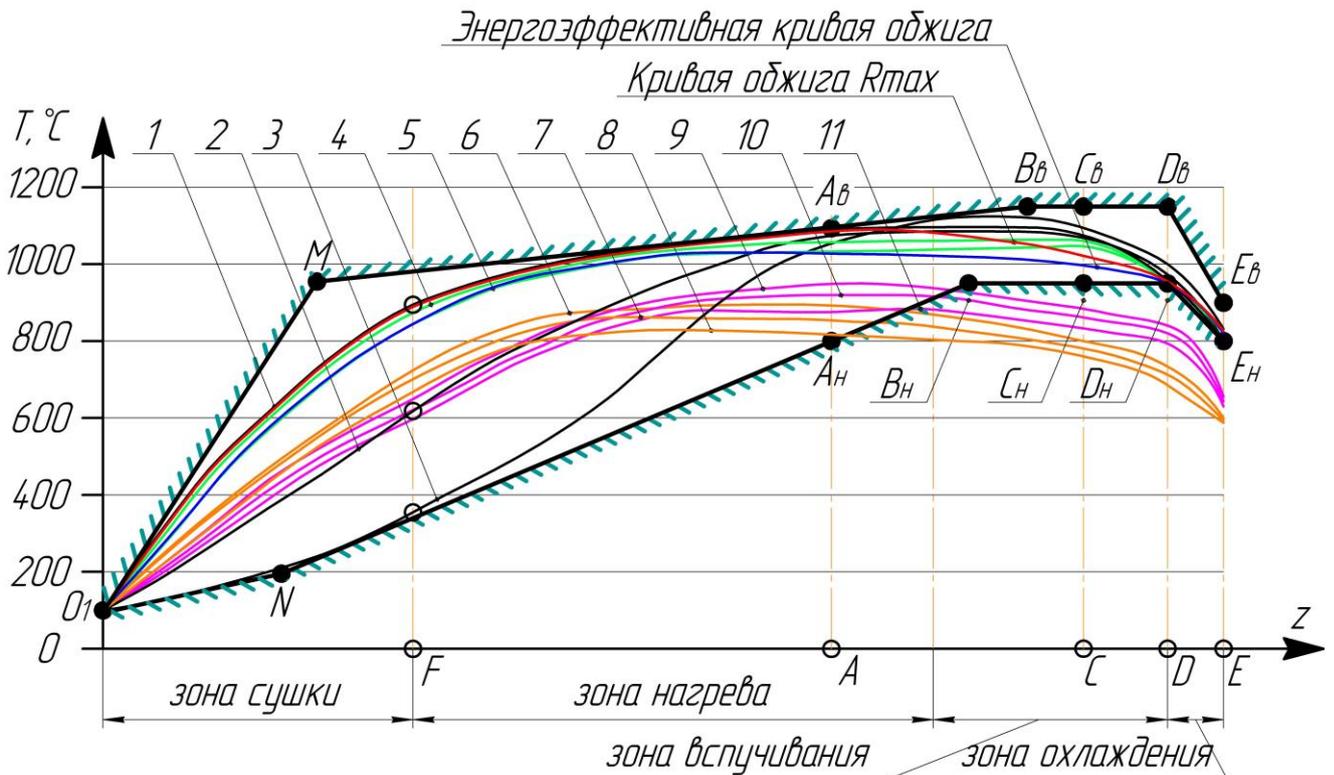


Рисунок 2.19 – Область существования кривых обжига для получения прочного керамзита

В программной среде SolidWorks проведено численное моделирование «в большом» по нахождению кривых обжига в построенной области существования (рис. 2.19) при изменении значений  $\omega_n$ ,  $q_3$ ,  $Q_r$  [38]. Тепловая мощность горелки изменялась в диапазоне  $Q_r = 33600 \text{ Вт/м}^3$ ;  $16800 \text{ Вт/м}^3$ ;  $11200 \text{ Вт/м}^3$ , загрузка сырца керамзита  $q_3 = 4,5 \text{ т/ч}$ ;  $8 \text{ т/ч}$ ;  $12 \text{ т/ч}$ , скорость вращения печи  $\omega_n = 0,08 \text{ рад/с}$ ;  $0,13 \text{ рад/с}$ ;  $0,26 \text{ рад/с}$ . Значения для каждой кривой обжига представлены в таблице 2.2 (кривые обжига на скоростях 0,13 и 0,26 рад/с (за исключением кривых 2 и 3) не показаны ввиду практически полного нахождения их за область существования получения керамзита).

Таблица 2.2 – Результаты численного моделирования

Кривая обжига №	$\omega_n$ , рад/с	$q_3$ , т/ч	$Q_r$ , Вт/м <sup>3</sup>
1	0,08	4,5	33600
2	0,13	4,5	33600
3	0,26	4,5	33600
4	0,08	8	33600
5		12	33600
6		4,5	16800
7		8	16800
8		12	16800
9		4,5	11200
10		8	11200
11		12	11200
Кривая обжига $R_{\max}$		4,5	28600
Энергоэффективная кривая обжига		12	28600

В результате получено семейство кривых обжига (рис. 2.19), которые показывают, что изменение загрузки сырца в 2-3 раза в рассматриваемой печи приводит к изменению температуры сырца керамзита максимум на  $100^\circ\text{C}$ , тогда как изменение мощности горелки приводит к изменению температуры в зонах сушки и вспучивания более чем на  $300^\circ\text{C}$ , тем самым переводя кривые обжига 6 – 11 за область существования получения керамзита. Следовательно, значительное изменение (в 2-3 раза от номинального) тепловой мощности приводит к нарушению технологического процесса и невозможности получить

керамзит в принципе. Путём численного моделирования установлено, что значение тепловой мощности  $Q_{\Gamma} = 28600 \text{ Вт/м}^3$  позволяет получать прочный керамзит с минимумом расхода газа, при этом получены две кривые обжига:

1) Кривая обжига  $R_{\max}$  (при  $\omega_{\text{п}} = 0,08 \text{ рад/с}$ ,  $q_3 = 4,5 \text{ т/ч}$ ,  $Q_{\Gamma} = 28600 \text{ Вт/м}^3$ ) – обеспечивающая максимальную прочность керамзита при меньшей производительности.

2) Энергоэффективная кривая обжига (при  $\omega_{\text{п}} = 0,08 \text{ рад/с}$ ,  $q_3 = 12 \text{ т/ч}$ ,  $Q_{\Gamma} = 28600 \text{ Вт/м}^3$ ) – обеспечивающая максимальную производительность с незначительным отклонением от  $R_{\max}$ .

В результате проведённых исследований (рис. 2.13 – 2.18) и численного моделирования (рис. 2.19, рис 2.23 – 2.26) установлено, что объект управления нестационарный. Изменение управляющих воздействий (скорости  $\omega_{\text{п}}$  вращения печи, величины загрузки  $q_3$  сырца керамзита и тепловой мощности горелки  $Q_{\Gamma}$ ) в сепаратных каналах оказывают влияние на температуру в остальных сечениях по межканальным связям, поэтому структура объекта управления (рис. 2.2) примет вид (рис. 2.20).

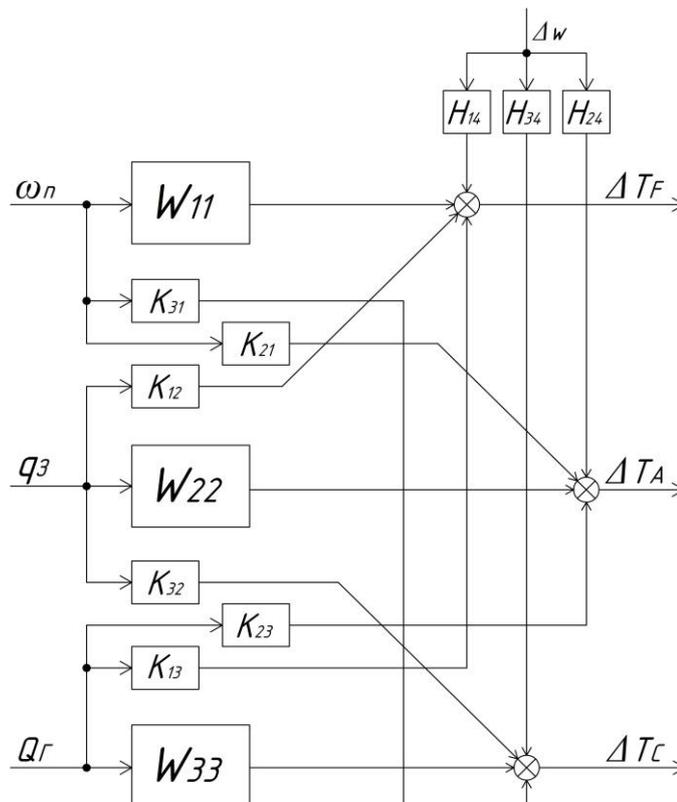


Рисунок 2.20 – Структурная схема объекта управления в статике

Операторы  $W_{ij}$  в сепаратных каналах представлены на рисунке 2.15, а операторы  $K_{ij}$  межканальных связей в статике и операторы  $H_{ij}$  возмущающих воздействий (где  $ij$  – порядковый номер) на рисунке 2.30 и в таблицах 2.4-2.7.

## **2.6 Моделирование обжига керамзита в печи с регулируемой скоростью вращения как объекта управления**

Точные методы решения систем дифференциальных уравнений с общими краевыми условиями, особенно при рассмотрении нелинейных задач, не нашли аналитического решения [84]. В таких случаях используют численные методы решения. Следует отметить, что численные методы решения довольно часто позволяют отказаться от упрощенной интерпретации математической модели. В данном случае для решения поставленной задачи дальнейшее моделирование будем проводить в программной среде SolidWorks Flow Simulation, использующей метод конечных объёмов. С её помощью возможно производить расчёты разнообразных течений: двух- и трёхмерных, ламинарных, турбулентных и переходных между этими течениями, сжимаемых и несжимаемых, с до-, транс- и сверхзвуковыми областями, стационарных и нестационарных, многокомпонентных газовых смесей с равновесной конденсацией содержащегося в них водяного пара, в каналах и/или вокруг тел, с учётом пограничного слоя, шероховатости стенок, гравитации, с конвективным, сопряжённым и радиационным теплообменом между твердым телом и текучей средой. Также программный продукт позволяет проводить одновременный расчёт теплопередачи в твердых телах, которые могут быть многослойными и состоять из различных материалов [84].

Применительно к вращающейся печи  $2,5 \times 40$  м, в которой обжигался сырец из слабовспучивающегося суглинка (например, бескудниковского) необходимый для получения керамзита с прочностью  $R = 8 - 10$  МПа, на основании разработанного математического описания (2.6) и краевых условий (2.7, 2.8) в программной среде SolidWorks была создана вычислительная модель (рис. 4.1) на основе методик [10,85], теплофизические и геометрические параметры которой соответствуют действующей установке. Данная математическая модель процесса обжига керамзита в печи как объекта с распределёнными параметрами позволяет определить температуру в любой произвольной точке объёма печи в функции изменения скорости вращения, режима работы газовой горелки и загрузки. Показано, что практически реализовать управление температурным полем печи можно, если измерять температуру в трёх опорных сечениях F, A и C, причём на температуру в сечении F в большей степени влияет скорость  $\omega_n$  вращения печи, в

сечении А – величина загрузки  $q_3$  сырца керамзита в печь, в сечении С – мощность  $Q_{\Gamma}$  горелки (рис. 2.27). Поэтому предложено построить систему, замкнутую по температуре в трёх указанных сечениях (глава 3 настоящей диссертации). Температуру можно измерять, например, при помощи датчиков температуры в этих сечениях. Применительно к такому подходу было предложено рассмотреть объект в качестве модели объекта с сосредоточенными параметрами (рис. 2.29). Для этого выполнена идентификация объекта как многомерного, где в качестве выходных координат принят вектор  $\bar{X}=[T_F, T_A, T_C]^T$  ( $T_F, T_A, T_C$  – температура в сечениях F, А и С (рис. 1.3)), а в качестве входных принят вектор  $\bar{U}=[\omega_{\text{п}}, q_3, Q_{\Gamma}]^T$  (скорость  $\omega_{\text{п}}$  вращения печи, загрузка  $q_3$  сырца керамзита и мощность горелки  $Q_{\Gamma}$ ). Основное возмущение – влажность  $w$  сырца. Для получения функций отклика как переходных функций в этих сечениях из множества температур, полученных при рассмотрении данного объекта как объекта с распределёнными параметрами, проведены исследования изменения во времени температур в сечениях F, А и С при типовом, в частности, ступенчатом изменении входных воздействий. При этом численное моделирование проводилось таким образом, что печь в динамике выводилась на установившийся режим работы и далее после окончания процесса «в большом» (через 24 часа), давались приращения «в малом» поочерёдно по изменению скорости вращения печи, загрузки сырца и мощности горелки в диапазонах 5–15% от установившегося значения (табл. 2.4-2.7).

Методика численного моделирования по исследованию объекта управления, в частности, изменения температуры керамзита в статическом и динамическом режимах включала в себя следующие этапы [34]:

1) Формирование условий создания вычислительной 3D модели печи в программной среде SolidWorks: а) теплообмен: теплопередача в твёрдых телах, радиационный теплообмен, объёмный тепловой источник (он моделирует факел печи) мощностью –  $33600 \text{ Вт/м}^3$ , вращение печи; б) состав дымовых газов:  $\text{CO}_2$  – углекислый газ,  $\text{N}_2$  – азот,  $\text{O}_2$  – кислород,  $\text{Ar}$  – аргон,  $\text{H}_2\text{O}$  – водяной пар; в) тип течения газа – турбулентный; г) материал слоёв печи: корпус – сталь Ст.3, футеровка – кирпич огнеупорный, обжигаемый материал – сырец керамзита; д) начальные условия газовой среды: температура –  $20^\circ\text{C}$ , скорость –  $10 \text{ м/с}$ , е) начальные и граничные условия печи; к) параметры расчётной сетки.

2) Исследование динамики прогрева печи  $2,5 \times 40\text{м}$ , в условиях ступенчатого изменения управляющих воздействий  $\omega_{\text{п}} = 0,26 \text{ с}^{-1}$ ,  $Q_{\text{г}} = 33600 \text{ Вт/м}^3$ , загрузки печи  $q_3 = 12,5 \text{ т/ч}$  сырцом керамзита влажностью  $w = 15\%$ , плотностью  $\rho_c = 1100 \text{ кг/м}^3$ , с коэффициентами теплопроводности  $\lambda = 2,6 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$  и теплоёмкости  $C = 0,5 \text{ кДж/кг}^\circ\text{С}$  (рис. 4.2, 4.3).

Задавалось расчётное время более 24 часов. В результате расчётов получен массив данных, соответствующих кривым переходного процесса температуры для любой точки в объёме печи до установившегося состояния.

Установлено, что время прогрева печи, полученное на модели 86400с, отличается от времени прогрева технологической установки (Безымянский керамзитовый завод) не более чем на 5%.

3) Исследование влияния скорости  $\omega_{\text{п}}$  на формирование кривой обжига керамзита. Из технологически допустимого диапазона изменения скорости  $\omega_{\text{п}}$  выбрано три значения  $\omega_{\text{п1}} = 0,26$ ,  $\omega_{\text{п2}} = 0,13$ ,  $\omega_{\text{п3}} = 0,08 \text{ с}^{-1}$ , для которых выполнены по методике, описанной (в пункте 2), расчёты печи как ОРП. В результате численного моделирования получены кривые обжига 1–3 (рис. 2.22), представляющие собой сечение расчётной поверхности (рис. 2.21) вдоль оси  $z$ . Выполнено их сравнение с результатами натурных исследований процесса обжига при вариации скорости вращения печи, полученных Онацким С.П. на печи  $2,5 \times 40\text{м}$ , кривые 4 – 6, которое показало, что погрешность, не превышает 5%. Отличие значений температуры в сечениях с координатами  $Z_{\text{F}}$ ,  $Z_{\text{C}}$  и  $Z_{\text{A}}$  составляет не более чем  $10^\circ\text{С}$ . Это является подтверждением адекватности созданной модели.

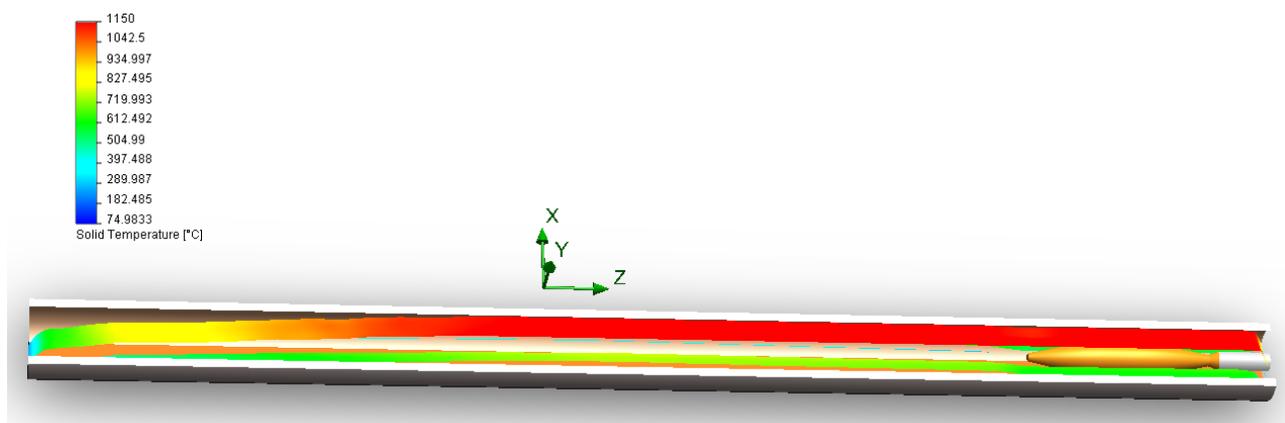
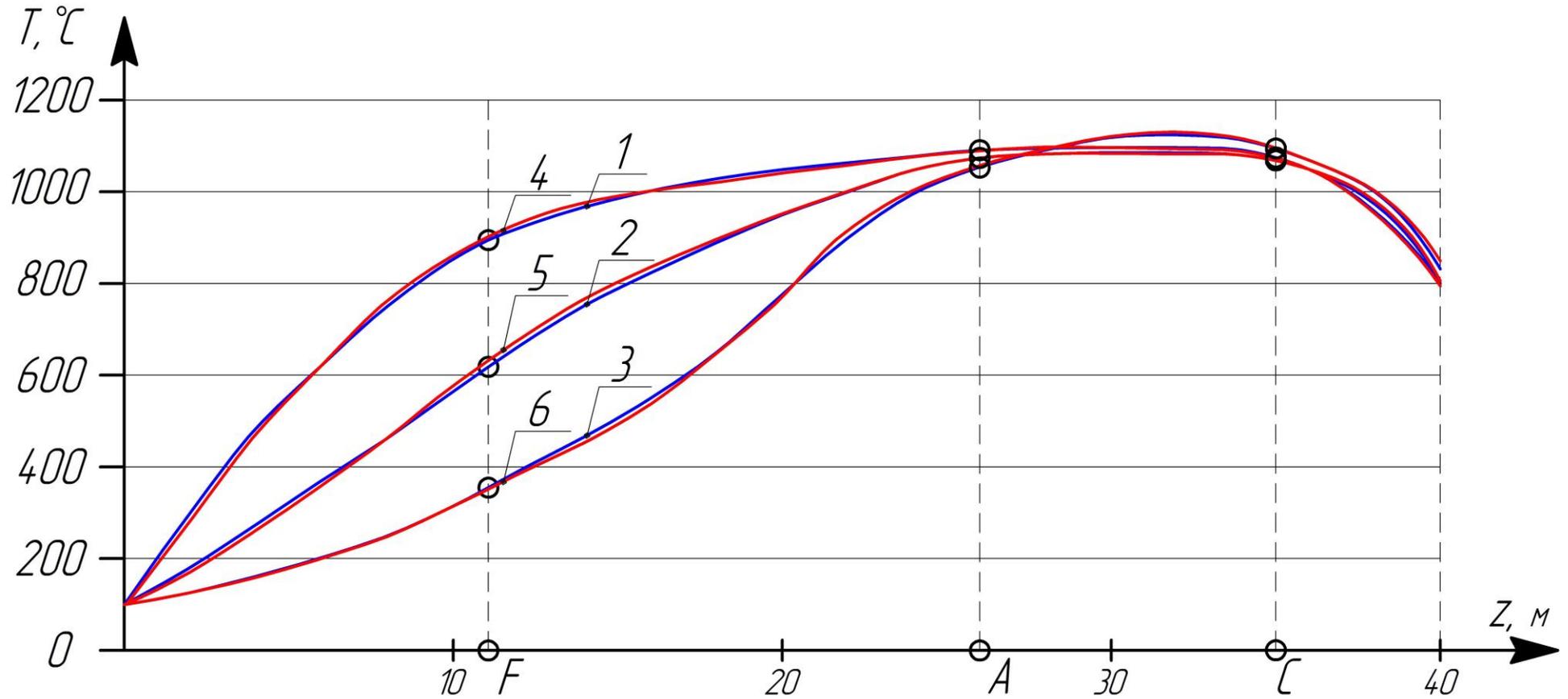


Рисунок 2.21 – Распределение температуры сырца керамзита по длине вращающейся печи (в разрезе)



1,2,3 – кривые обжига керамзита при термообработке 80, 60 и 40 мин соответственно [1];

4,5,6 – кривые моделирования, при  $\omega_{п} = 0,08; 0,13$  и  $0,26 \text{ с}^{-1}$  соответственно

Рисунок 2.22 – Кривые обжига вращающейся печи  $2,5 \times 40 \text{ м}$

4) Исследования обжига керамзита в динамике. Допуская, что технологический режим обжига керамзита с заданной величиной  $R$  соответствует малым отклонениям управляющих воздействий относительно рабочей точки ( $\omega_{п0}$ ,  $q_{з0}$ ,  $Q_{г0}$ ), осуществлён структурный синтез многомерного объекта управления (рис. 2.29), в котором в качестве выходных координат принята температура в трёх характерных опорных сечениях печи:  $F$ ,  $A$  и  $C$  (рис. 2.22), а вектор управляющих воздействий включает в себя  $\omega_{п}$ ,  $q_{з}$ ,  $Q_{г}$ , основное возмущение  $w$  сырца.

Для нахождения собственных операторов и операторов перекрёстных связей этой структуры, описывающих динамику процесса обжига в малых отклонениях относительно некоторой кривой обжига, на разработанной модели ОРП поставлена серия вычислительных экспериментов.

Для этого в модели ОРП, соответствующей технологическому режиму обжига керамзита, скачкообразно изменялись управляющие воздействия в виде малых отклонений  $\Delta\omega_{п}$ ,  $\Delta q_{з}$ ,  $\Delta Q_{г}$  и возмущения  $\Delta w$  от установившегося режима. При этом наблюдались динамические процессы изменения температуры керамзита в характерных сечениях  $F$ ,  $A$  и  $C$  печи. Исследования функций отклика обжига в сечениях печи  $F$ ,  $A$  и  $C$  на ступенчатые изменения «в малом» одного из управляющих или возмущающих воздействий проводились при условии, когда другие воздействия постоянны. Величины ступенчатых воздействий  $\Delta\omega_{п} = \pm 5\%$ ;  $\pm 10\%$ ;  $\pm 15\%$  от значений  $\omega_{п0} = 0,26; 0,13; 0,08 \text{ с}^{-1}$  (рис. 2.23),  $\Delta q_{з} = + 3,5; + 7,5 \text{ т/ч}$  от  $q_{з} = 4,5 \text{ т/ч}$  (рис. 2.24),  $\Delta Q_{г} = \pm 1888; \pm 3776; \pm 5664 \text{ Вт/м}^3$  от  $Q_{г} = 33600 \text{ Вт/м}^3$  (рис. 2.25),  $\Delta w = \pm 10\%; \pm 30\%$  от  $w = 15\%$  (рис. 2.26).

По результатам численного моделирования можно сделать вывод, что влияние перекрёстных связей составляет от 5 до 30% по сравнению с основными управляющими воздействиями в этих каналах. При этом наблюдается соответствующее определённому управляющему воздействию запаздывание.

Далее осуществлялась идентификация собственных операторов и операторов перекрёстных связей многомерного объекта по переходным характеристикам по отношению к управляющим и возмущающим воздействиям.

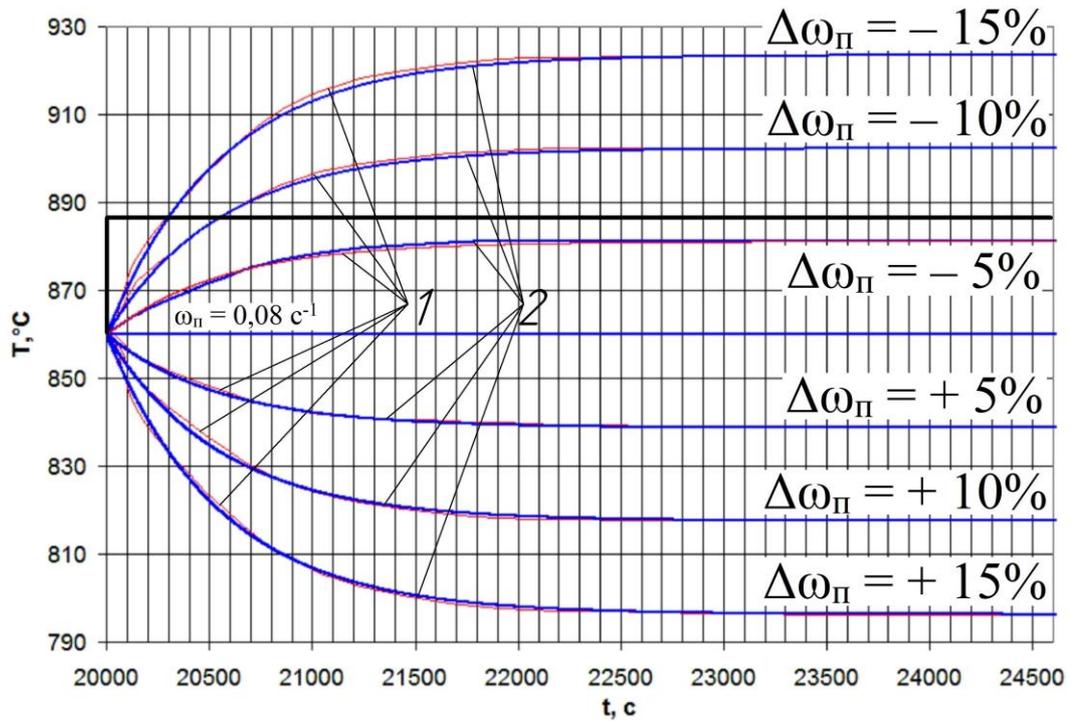


Рисунок 2.23 – Сравнение графиков зависимостей температуры сырца керамзита  $T_F$  от времени при изменении скорости вращения печи от  $\omega_{\pi} = 0,08 \text{ c}^{-1}$  на  $\Delta\omega_{\pi} = \pm 5\%$ ;  $\pm 10\%$ ;  $\pm 15\%$ ; 1 – SolidWorks, 2 – MATLAB

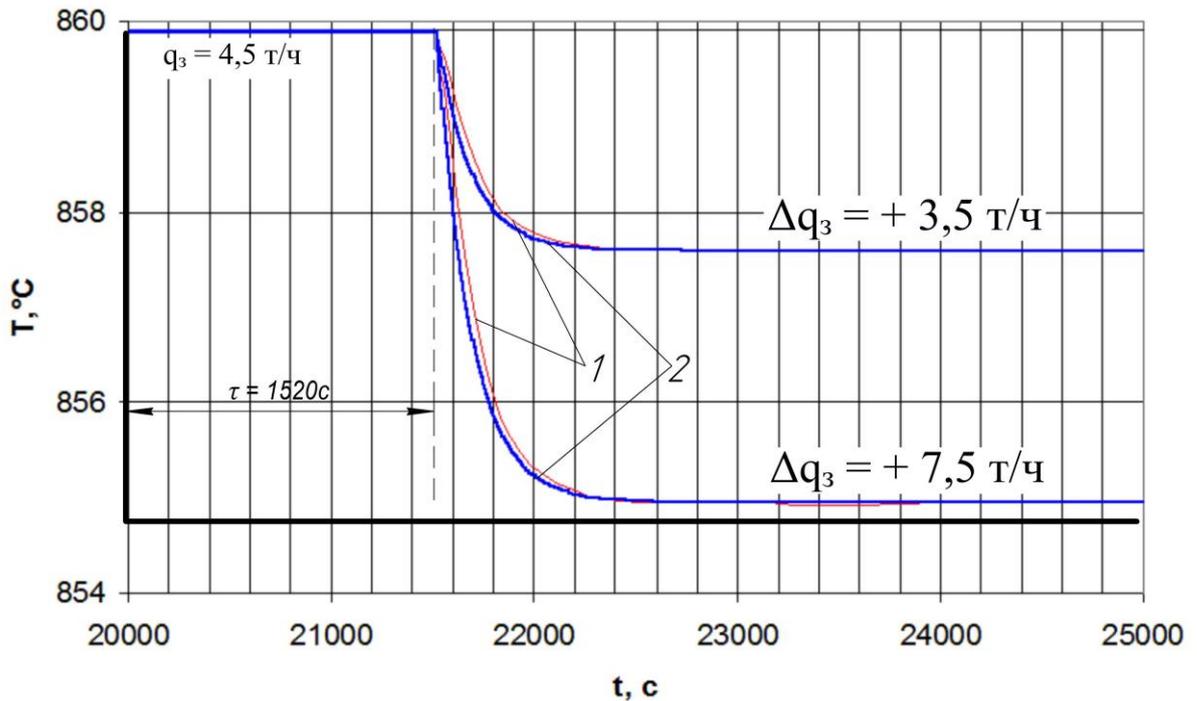
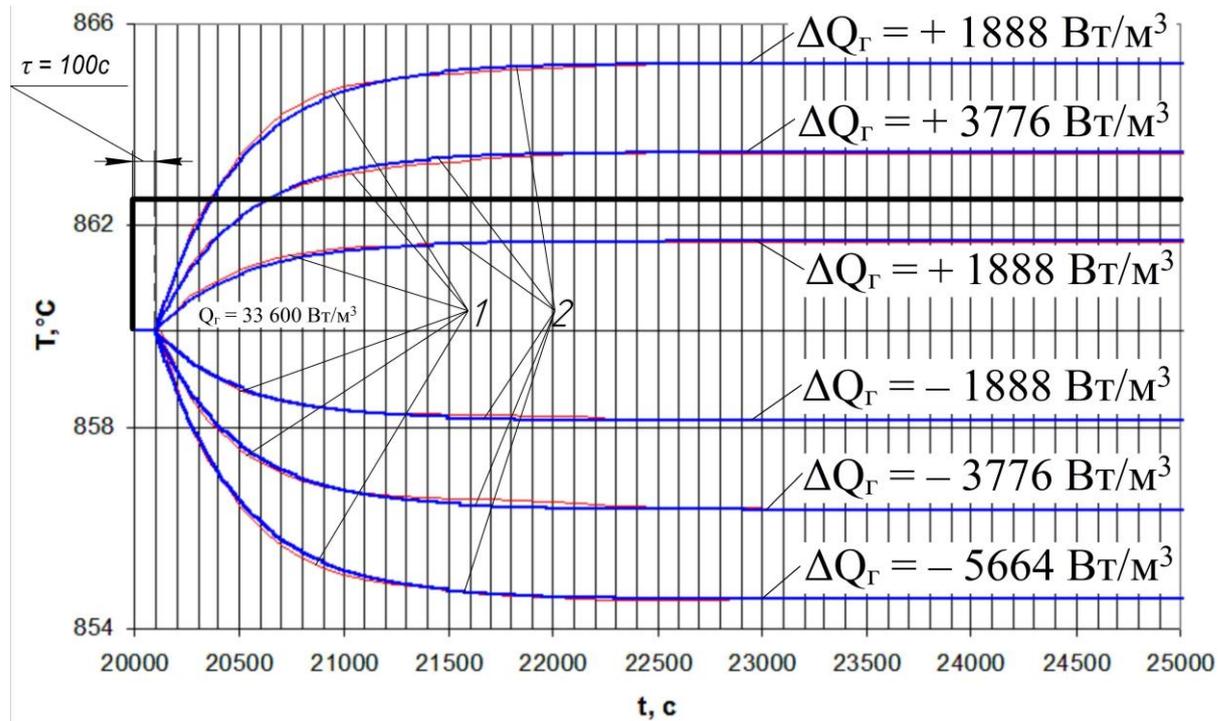
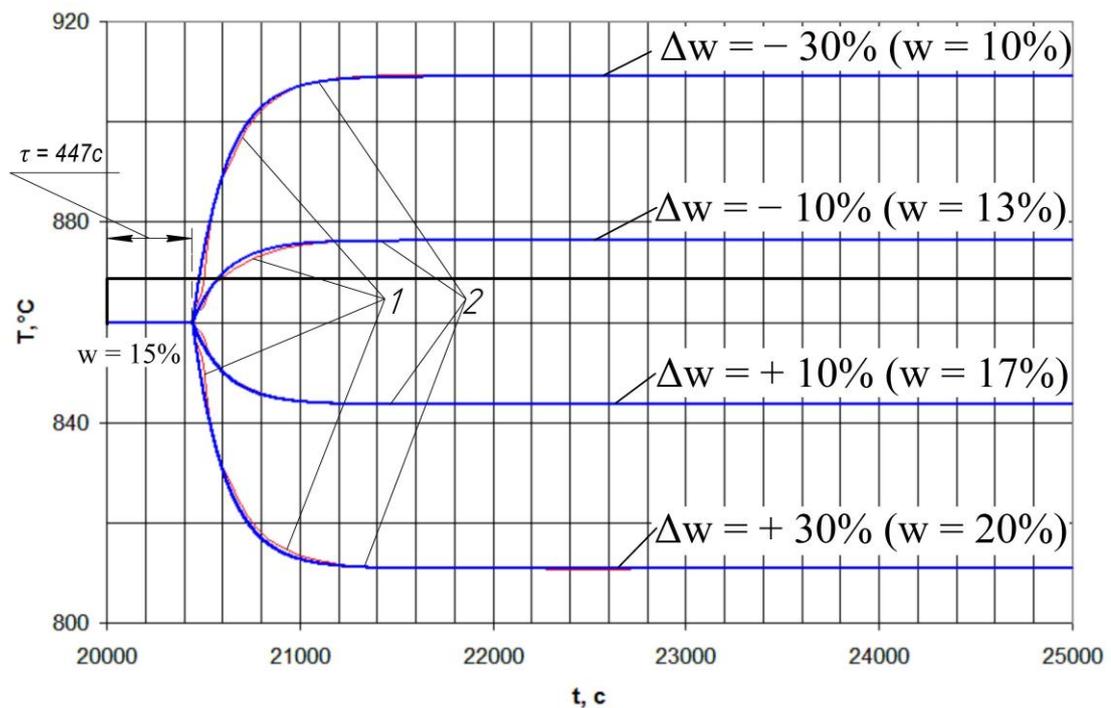


Рисунок 2.24 – Сравнение графиков зависимостей температуры сырца керамзита  $T_F$  от изменения загрузки сырца  $q_3 = 4,5 \text{ т/ч}$  на  $\Delta q_3 = +3,5 \text{ т/ч}$ ;  $+7,5 \text{ т/ч}$ ; 1 – SolidWorks, 2 – MATLAB



1 – SolidWorks, 2 – MATLAB

Рисунок 2.25 – Сравнение графиков зависимостей температуры сырца керамзита  $T_F$  от изменения мощности горелки  $Q_\Gamma = 33600 \text{ Вт/м}^3$  на  $\Delta Q_\Gamma = \pm 1888 \text{ Вт/м}^3$ ;  $\pm 3776 \text{ Вт/м}^3$ ;  $\pm 5664 \text{ Вт/м}^3$



1 – SolidWorks, 2 – MATLAB

Рисунок 2.26 – Сравнение графиков зависимостей температуры сырца керамзита  $T_F$  от изменении влажности сырца от  $w = 15\%$  на  $\Delta w = \pm 10\%$  ( $w = 17\%; 13\%$ );  $\Delta w = \pm 30\%$  ( $w = 20\%; 10\%$ )

Сравнительный анализ полученного множества кривых переходного процесса выполненного численного моделирования показывает, что температура в рассматриваемых сечениях имеет монотонный характер и связь ступенчатого воздействия с этой температурой можно представить апериодическим звеном или последовательным соединением апериодического звена и звена запаздывания (рис. 2.23 – 2.26). Это выполнено применительно к связи собственного воздействия с выходной координатой и других воздействий, т.е. получены перекрестные связи (рис. 2.27). Аппроксимация характеристик, полученных на модели с распределенными параметрами и передаточными функциями с сосредоточенными параметрами, проводилась в программной среде MATLAB (рис. 2.23 – 2.26), при этом величина среднеквадратичного отклонения не превысила 5%. На основании вышеизложенного, представим рассматриваемый объект в виде многомерного, где собственные передаточные функции и передаточные функции перекрестных связей ((2.21) и табл. 2.3)) описаны моделями объекта с сосредоточенными параметрами с переменными  $K$ ,  $T$  и  $\tau$ . Параметры передаточных функций  $W_{11}$ ,  $W_{22}$ ,  $W_{33}$ ,  $M_{31}$ ,  $M_{21}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{32}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{23}$ ,  $H_{14}$ ,  $H_{24}$ ,  $H_{34}$  приведены в таблицах 2.4 – 2.7.

Для оценки взаимовлияния каналов  $T_F$ ,  $T_A$ ,  $T_C$  после выхода вращающейся печи на рабочий режим, на объект управления подавались управляющие воздействия (для большей наглядности представлены на рисунке 2.27) «в малом»: приращение скорости вращения печи  $\Delta\omega_{\text{п}} = 0,012$  рад/с, приращение величины загрузки сырца керамзита во вращающуюся печь  $\Delta q_3 = 3,5$  т/ч, приращение объёмной тепловой мощности газовой горелки  $\Delta Q_{\text{г}} = 5664$  Вт/м<sup>3</sup>.

По результатам численного моделирования (рис. 2.27) для сечений F, A и C соответственно, можно сделать вывод, что изменение скорости вращения печи  $\Delta\omega_{\text{п}}$  на перекрестные каналы A и C составляет 10% и 5,7% соответственно, по

сравнению с основными управляющими воздействиями в этих каналах; изменение величины загрузки сырца  $\Delta q_3$  на перекрёстные каналы F и C составляет 16,6% и 21,4% соответственно, по сравнению с основными управляющими воздействиями в этих каналах; изменение объёмной тепловой мощности горелки  $\Delta Q_T$  на перекрёстные каналы F и A составляет 30% и 12,5% соответственно, по сравнению с основными управляющими воздействиями в этих каналах. При этом наблюдается соответствующее определённому управляющему воздействию запаздывание.

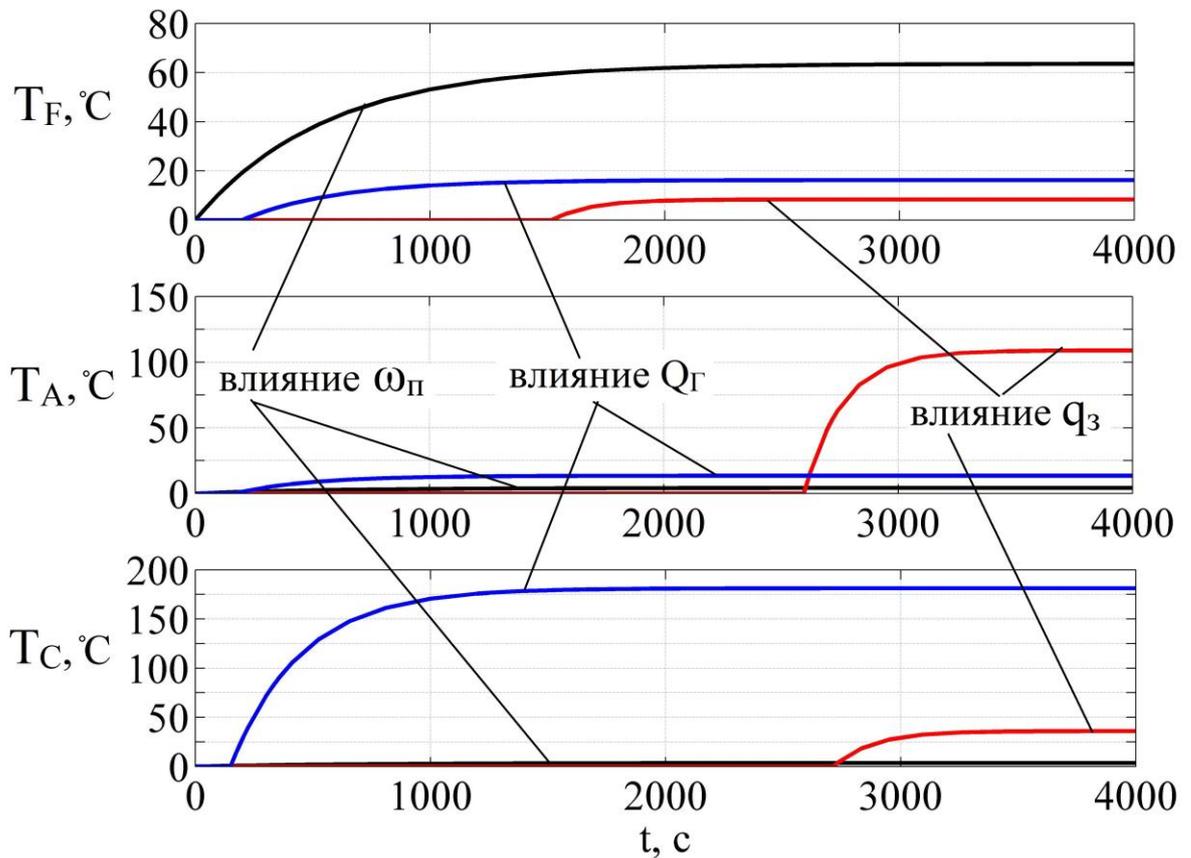


Рисунок 2.27 – Взаимовлияние температур в каналах F, A и C

Синтезирована матричная структура многомерного объекта (рис. 2.28) [34].  
Здесь  $\bar{U}$ ,  $\bar{N}$ ,  $\bar{X}$  – векторы управляющих, возмущающих и выходных координат  $\bar{U} = [\Delta\omega_{\text{П}}, \Delta q_3, \Delta Q_T]^T$ ,  $\bar{N} = [\Delta w]$ ,  $\bar{X} = [\Delta T_F, \Delta T_A, \Delta T_C]^T$ ; A и B – операторы объекта управления по отношению к векторам  $\bar{U}$  и  $\bar{N}$ .

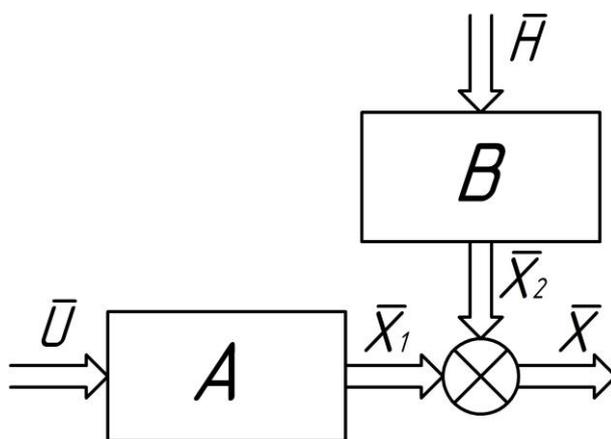


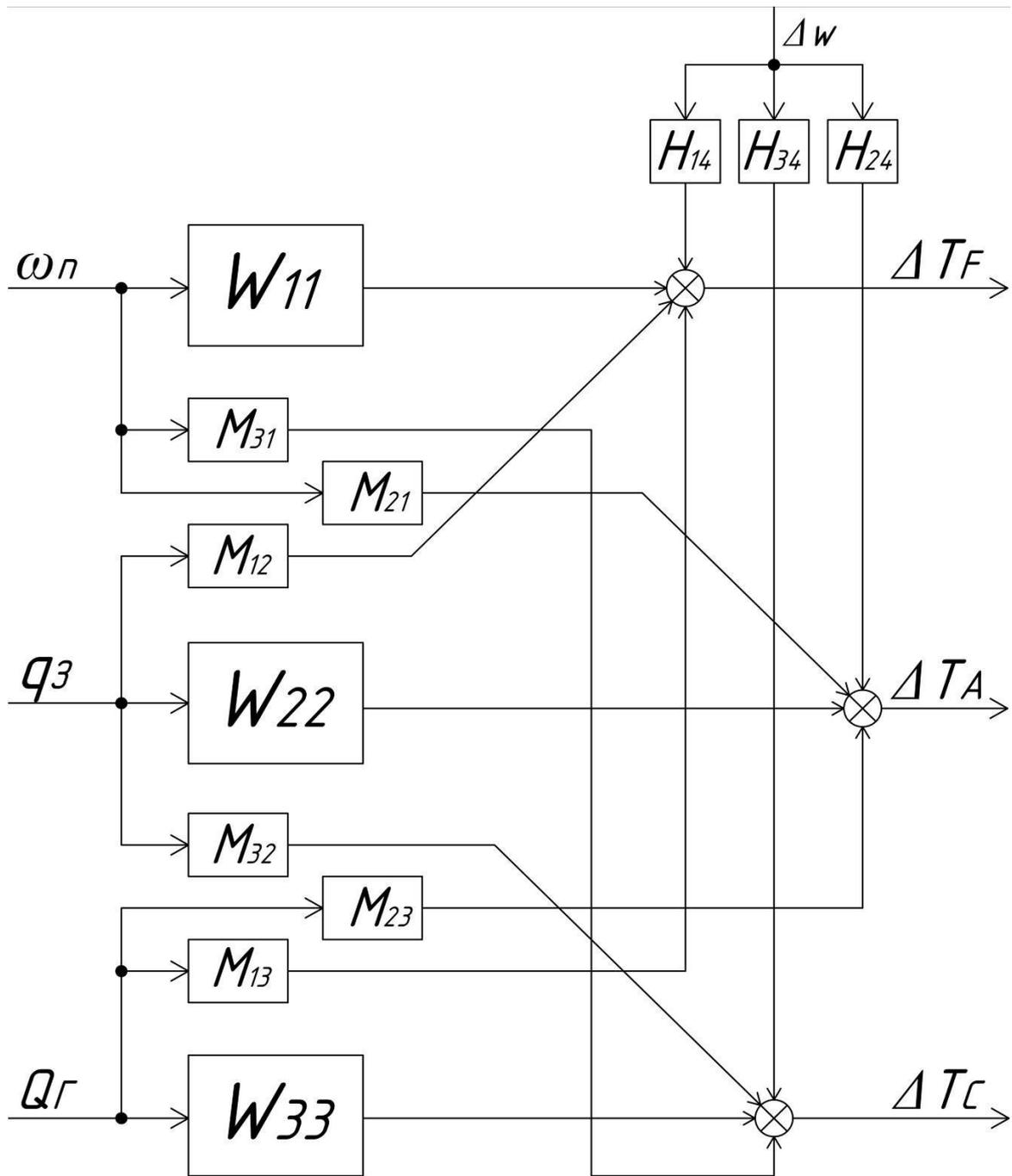
Рисунок 2.28 – Матричная структура многомерного объекта

Допускаем, что технологический режим обжига керамзита с заданной величиной  $R$  соответствует малым отклонениям управляющих воздействий относительно рабочей точки  $(\omega_{п0}, q_{з0}, Q_{г0})$ . Поэтому, на основании матричной структуры синтезирована многомерная структура объекта управления (рис. 2.29). Для неё матричное уравнение объекта управления:

$$\bar{X} = A \cdot \bar{U} + B \cdot \bar{H}, \quad (2.20)$$

$$\text{где } A = \begin{vmatrix} W_{11}(p) & M_{12}(p) & M_{13}(p) \\ M_{21}(p) & W_{22}(p) & M_{23}(p) \\ M_{31}(p) & M_{32}(p) & W_{33}(p) \end{vmatrix}; \quad B = \begin{vmatrix} H_{14}(p) & H_{24}(p) & H_{34}(p) \end{vmatrix},$$

$$\left. \begin{aligned} W_{11}(p), M_{21}(p), M_{31}(p) &= \frac{K_{i1}}{T_{i1}p + 1}, \\ M_{12}(p), W_{22}(p), M_{32}(p) &= \frac{K_{i2}}{T_{i2}p + 1} e^{-\tau_{i2}p}, \\ M_{13}(p), M_{23}(p), W_{33}(p) &= \frac{K_{i3}}{T_{i3}p + 1} e^{-\tau_{i3}p}, \\ H_{14}(p), H_{24}(p), H_{34}(p) &= \frac{K_{i4}}{T_{i4}p + 1} e^{-\tau_{i4}p}, i \in 1, 2, 3 \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$



$W_{11}, W_{22}, W_{33}$  – собственные передаточные функции;

$M_{31}, M_{21}, M_{12}, M_{32}, M_{13}, M_{23}$  – передаточные функции межканальных связей по управлению;  $H_{14}, H_{24}$  и  $H_{34}$  – передаточные функции по отношению к возмущению

Рисунок 2.29 – Структурная схема объекта управления

Таблица 2.3 – Передаточные функции динамических моделей объекта управления

Точка	Передаточные функции			
	по управлению $\omega_n$	по управлению $Q_r$	по управлению $q_3$	по возмущению $w$
F	$W_{T_F}^{y\omega_n}(p) = \frac{\Delta T_F(p)}{\Delta \omega(p)} =$ $= \frac{K_F^{y\omega_n}}{T_F^{y\omega_n} p + 1}$	$M_{T_F}^{yQ_r}(p) = \frac{\Delta T_F(p)}{\Delta Q_r(p)} =$ $= \frac{K_F^{yQ_r} e^{-\tau_F^{yQ_r} p}}{T_F^{yQ_r} p + 1}$	$M_{T_F}^{yq_3}(p) = \frac{\Delta T_F(p)}{\Delta q_3(p)} =$ $= \frac{K_F^{yq_3} e^{-\tau_F^{yq_3} p}}{T_F^{yq_3} p + 1}$	$H_{T_F}^{BW}(p) = \frac{\Delta T_F(p)}{\Delta w(p)} =$ $= \frac{K_F^{BW} e^{-\tau_F^B p}}{T_F^B p + 1}$
A	$M_{T_A}^{y\omega_n}(p) = \frac{\Delta T_A(p)}{\Delta \omega(p)} =$ $= \frac{K_A^{y\omega_n}}{T_A^{y\omega_n} p + 1}$	$M_{T_A}^{yQ_r}(p) = \frac{\Delta T_A(p)}{\Delta Q_r(p)} =$ $= \frac{K_A^{yQ_r} e^{-\tau_A^{yQ_r} p}}{T_A^{yQ_r} p + 1}$	$W_{T_A}^{yq_3}(p) = \frac{\Delta T_A(p)}{\Delta q_3(p)} =$ $= \frac{K_A^{yq_3} e^{-\tau_A^{yq_3} p}}{T_A^{yq_3} p + 1}$	$H_{T_A}^{BW}(p) = \frac{\Delta T_A(p)}{\Delta w(p)} =$ $= \frac{K_A^{BW} e^{-\tau_A^B p}}{T_A^B p + 1}$
C	$M_{T_C}^{y\omega_n}(p) = \frac{\Delta T_C(p)}{\Delta \omega(p)} =$ $= \frac{K_C^{y\omega_n}}{T_C^{y\omega_n} p + 1}$	$W_{T_C}^{yQ_r}(p) = \frac{\Delta T_C(p)}{\Delta Q_r(p)} =$ $= \frac{K_C^{yQ_r} e^{-\tau_C^{yQ_r} p}}{T_C^{yQ_r} p + 1}$	$M_{T_C}^{yq_3}(p) = \frac{\Delta T_C(p)}{\Delta q_3(p)} =$ $= \frac{K_C^{yq_3} e^{-\tau_C^{yq_3} p}}{T_C^{yq_3} p + 1}$	$H_{T_C}^{BW}(p) = \frac{\Delta T_C(p)}{\Delta w(p)} =$ $= \frac{K_C^{BW} e^{-\tau_C^B p}}{T_C^B p + 1}$

Таблица 2.4 – Параметры объекта управления по отношению к управлению  $\omega_n$ 

		$\omega_n = 0,26$		$\omega_n = 0,13$		$\omega_n = 0,08$	
Точка	$\Delta\omega_n$	$K_{11}$	$T_{11}, c$	$K_{11}$	$T_{11}, c$	$K_{11}$	$T_{11}, c$
F	$\pm 5\%$	1250	290	3490	430	5300	555
	$\pm 10\%$						
	$\pm 15\%$						
A	$\Delta\omega_n$	$K_{21}$	$T_{21}, c$	$K_{21}$	$T_{21}, c$	$K_{21}$	$T_{21}, c$
	$\pm 5\%$	128	330	215	530	350	625
	$\pm 10\%$						
	$\pm 15\%$						
C	$\Delta\omega_n$	$K_{31}$	$T_{31}, c$	$K_{31}$	$T_{31}, c$	$K_{31}$	$T_{31}, c$
	$\pm 5\%$	103	380	184	580	298	705
	$\pm 10\%$						
	$\pm 15\%$						

Таблица 2.5 – Параметры объекта управления по отношению к управлению  $Q_r$ 

		$\omega_n = 0,26$			$\omega_n = 0,13$			$\omega_n = 0,08$		
Точка	$\Delta Q_r, (Вт/м^3)$	$K_{13}$	$T_{13}, c$	$\tau_{13}, c$	$K_{13}$	$T_{13}, c$	$\tau_{13}, c$	$K_{13}$	$T_{13}, c$	$\tau_{13}, c$
F	$\pm 1888$	0,002	400	200	0,00254	400	200	0,00287	400	200
	$\pm 3776$									
	$\pm 5664$									
A	$\Delta Q_r, (Вт/м^3)$	$K_{23}$	$T_{23}, c$	$\tau_{23}, c$	$K_{23}$	$T_{23}, c$	$\tau_{23}, c$	$K_{23}$	$T_{23}, c$	$\tau_{23}, c$
	$\pm 1888$	0,00237	320	170	0,00237	320	170	0,00237	320	170
	$\pm 3776$									
	$\pm 5664$									
C	$\Delta Q_r, (Вт/м^3)$	$K_{33}$	$T_{33}, c$	$\tau_{33}, c$	$K_{33}$	$T_{33}, c$	$\tau_{33}, c$	$K_{33}$	$T_{33}, c$	$\tau_{33}, c$
	$\pm 1888$	0,032	300	150	0,032	300	150	0,032	300	150
	$\pm 3776$									
	$\pm 5664$									

Таблица 2.6 – Параметры объекта управления по отношению к управлению  $q_3$ 

		$\omega_n = 0,26$			$\omega_n = 0,13$			$\omega_n = 0,08$		
Точка	$\Delta q_3$ (Т/ч)	$K_{12}$	$T_{12}, c$	$\tau_{12}, c$	$K_{12}$	$T_{12}, c$	$\tau_{12}, c$	$K_{12}$	$T_{12}, c$	$\tau_{12}, c$
F	+ 3,5	-3,65	165	710	-2,46	165	1120	-1,859	165	1520
	+ 7,5									
A	$\Delta q_3$ (Т/ч)	$K_{22}$	$T_{22}, c$	$\tau_{22}, c$	$K_{22}$	$T_{22}, c$	$\tau_{22}, c$	$K_{22}$	$T_{22}, c$	$\tau_{22}, c$
	+ 3,5	-48	165	1215	-32	165	1915	-24	165	2600
	+ 7,5									
C	$\Delta q_3$ (Т/ч)	$K_{32}$	$T_{32}, c$	$\tau_{32}, c$	$K_{32}$	$T_{32}, c$	$\tau_{32}, c$	$K_{32}$	$T_{32}, c$	$\tau_{32}, c$
	+ 3,5	-16	165	1269	-10,8	165	2000	-8	165	2715
	+ 7,5									

Таблица 2.7 – Параметры объекта управления по отношению к возмущению  $w$ 

		$\omega_n = 0,26$			$\omega_n = 0,13$			$\omega_n = 0,08$		
Точка	$\Delta w$	$K_{14}$	$T_{14}, c$	$\tau_{14}, c$	$K_{14}$	$T_{14}, c$	$\tau_{14}, c$	$K_{14}$	$T_{14}, c$	$\tau_{14}, c$
F	$\pm 10\%$	-2,165	170	447	-2,86	170	447	-3,273	170	447
	$\pm 30\%$									
A	$\Delta w$	$K_{24}$	$T_{24}, c$	$\tau_{24}, c$	$K_{24}$	$T_{24}, c$	$\tau_{24}, c$	$K_{24}$	$T_{24}, c$	$\tau_{24}, c$
	$\pm 10\%$	-0,87	170	1267	-0,95	170	1267	-1,03	170	1267
	$\pm 30\%$									
C	$\Delta w$	$K_{34}$	$T_{34}, c$	$\tau_{34}, c$	$K_{34}$	$T_{34}, c$	$\tau_{34}, c$	$K_{34}$	$T_{34}, c$	$\tau_{34}, c$
	$\pm 10\%$	-1,1	170	1417,5	-1,24	170	1417,5	-1,46	170	1417,5
	$\pm 30\%$									

Выполнен анализ статических характеристик натуральных экспериментов, произведённых С.П. Онацким [1] и численного моделирования (рис. 2.30) сепаратного канала  $K_{11}$  и межканальных связей  $K_{21}$  и  $K_{31}$ , которые показали, что величина среднеквадратичного отклонения не превышает 5%. Это подтверждает адекватность созданной математической модели в статике. Зависимость величины запаздывания  $\tau_{12}$  хорошо коррелирует с влиянием  $\omega_n$  на величину скорости  $v_m$  движения материала. Изменение коэффициентов передачи составляет  $K_{12} = -1,859 \div -3,65$ ,  $K_{13} = 0,00287 \div 0,002$ ,  $K_{14} = -3,273 \div -2,165$ , что объясняется изменением скорости вращения печи.

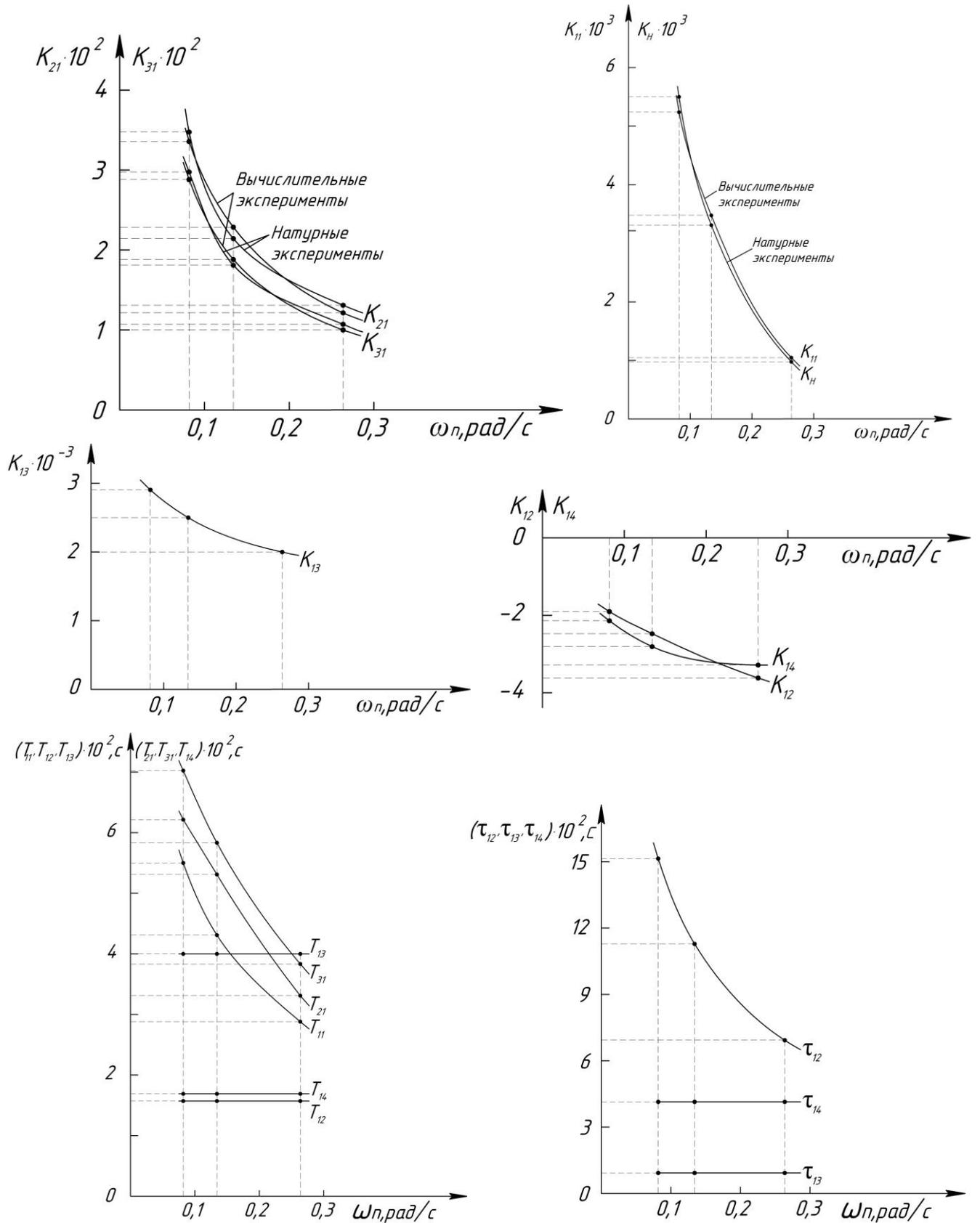


Рисунок 2.30 – Зависимости коэффициентов передачи  $K$ , постоянных времени  $T$  и запаздывания  $\tau$  от скорости вращения печи  $\omega_n$  при мощности горелки  $Q_r = 33600 \text{ Вт/м}^3$  и приращениях  $\Delta Q_r = \pm 1888; \pm 3776; \pm 5664 \text{ Вт/м}^3$ , и изменении загрузки сырца  $q_3 = 4,5 \text{ т/ч}$  на  $\Delta q_3 = + 3,5; + 7,5 \text{ т/ч}$

Выполнена проверка адекватности разработанной математической модели в динамике в «большом» на модели с распределёнными параметрами. Для этого проведено сравнение кривых обжига (рис. 2.22), полученных на вычислительных моделях (кривые 1 – 3) [33,48] с результатами натуральных исследований процесса обжига, выполненных С.П. Онацким в заводских условиях на печи 2,5×40м [1]. Онацким С.П. проведена серия экспериментов по обжигу керамзита во вращающейся печи (при номинальных значениях загрузки и тепловой мощности горелки), где путём изменения её скорости изменялась продолжительность пребывания сырца керамзита во вращающейся печи – 80, 60 и 40 мин. В данном диссертационном исследовании при проведении численного моделирования на математической модели задавались значения скорости  $\omega_{п} = 0,08; 0,13$  и  $0,26 \text{ с}^{-1}$ , что соответствует времени обжига керамзита 80, 60 и 40 мин соответственно. В результате получены температурные кривые (рис. 2.22, кривые 1 – 3), которые при сравнении удовлетворительно совпали с экспериментальными данными (рис. 2.22, кривые 4 – 6), полученными С.П. Онацким с погрешностью, не превышающей 5%. В результате сделано предположение, что и на модели с сосредоточенными параметрами «в малом» температурные кривые тоже совпадут.

Таким образом, считаем, что разработанная математическая модель технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи адекватно описывает характер процесса обжига, протекающего в реальных условиях.

### **Выводы по второй главе**

1. Под объектом управления понимается технологический процесс обжига керамзита во вращающейся печи. Он представлен совокупностью теплофизических процессов, протекающих при обжиге керамзита, и электромеханических процессов в исполнительных электроприводах вращающейся печи, ленточного питателя и горелки. При этом состояние объекта управления определяется вектором выходных координат  $\bar{X} = [T_F, T_A, T_C]^T$ , где  $T_F, T_A, T_C$  температура в сечениях F, A и C по оси печи соответственно, который, в рамках известных допущений, определяет кривую обжига и прочность производимого керамзита.

2. При моделировании объекта управления был принят ряд допущений, а именно: химический и минералогический состав глины для обжига керамзита остается неизменным; сырец керамзита расположен слоем одной толщины по всей внутренней поверхности печи; температура сырца керамзита и дымовых газов в сечении  $z_i$  неизменны; в печи установлена горелка, работающая на газообразном топливе со стабильными значениями состава и температуры газа; температура атмосферного воздуха окружающего печь и подаваемого в горелку постоянна; скорость дымовых газов в продольном направлении печи неизменна.

Для исследования объекта управления разработана расчётная схема вращающейся печи в виде трёхслойного цилиндра, состоящего из стального корпуса, огнеупорного кирпича и сырца керамзита, равномерно распределённого по внутренней поверхности футеровки.

3. На основании известных экспериментальных исследований обжига керамзита определены зависимости значений прочности керамзита  $R$  от соответствующих им температур в трёх опорных сечениях печи  $T_F, T_A, T_C$ , показана целесообразность отображения прочностных характеристик керамзита в трёхмерном ортогональном пространстве  $OT_FT_AT_C$  в виде температурно-прочностной характеристики (ТПХ). Разработана методика построения ТПХ на основании анализа опытных кривых обжига или результатов вычислительных экспериментов.

Для установившегося режима печи в рамках известных технологических ограничений найдена область существования кривой обжига для получения прочного керамзита в пространстве трёх управляющих воздействий: скорости  $\omega_n$  вращения печи, величины загрузки  $q_3$  сырца в печь и объёмной тепловой мощности  $Q_r$  горелки. Рассмотрены особенности электроприводов ленточного питателя, вращающейся печи и газовой горелки.

4. Разработано математическое описание технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи как объекта управления с распределёнными параметрами, которое включает в себя модель термодинамики газовой среды (дымовых газов) и теплопередачи в твёрдом теле (слоями вращающейся печи и керамзитом), а также модели исполнительных электродвигателей. Приведены обоснования выбора начальных и граничных условий уравнений. Выполнено

численное решение уравнений в программной среде SolidWorks применительно к печи  $2,5 \times 40$  м, в которой осуществляется обжиг глины бескудниковского месторождения.

Синтезирована структура вращающейся печи в виде многомерной модели с сосредоточенными параметрами, где выходными координатами является температура в трёх характерных сечениях печи F, A и C, ориентированная на синтез системы автоматического управления вращающейся печью для обжига керамзита по заданным значениям прочности R и насыпной плотности  $\rho$ .

Применяя разработанную методику, проведения численного моделирования, получен массив данных температурного поля печи, как в переходных, так и в установившихся режимах. Для выбранных сечений F, A и C из найденного массива сделана выборка изменения температуры в этих сечениях «в большом» и «в малом» во времени. Обработка этих временных зависимостей по отношению к скачкообразным управляющим и возмущающим воздействиям позволила найти математические модели операторов многомерного объекта управления в форме передаточных функций.

Показано, что по отношению к скорости  $\omega_n$  они представляют собой апериодические звенья с нестационарными значениями постоянной времени ( $T_{11} = 290 \div 550$  с) и коэффициента передачи  $K_{11} = (1,25 \div 5,3) 10^3$  °C/(рад/с). Остальные операторы многомерного объекта описаны последовательным соединением апериодического звена и звена запаздывания. Параметры звеньев операторов по отношению к объёмной мощности  $Q_r$  стационарны ( $T_{33} = 300$  с,  $\tau_{33} = 150$  с,  $K_{33} = 32 \cdot 10^{-3}$  °C/(Вт/м<sup>3</sup>), а операторов по отношению к загрузке  $q_3$  – нестационарны ( $\tau_{22} = 1215 \div 2600$  с,  $K_{22} = 24 \div 48$  °C/(т/ч),  $T_{22} = 165$  с).

5. Показано (путём сравнения кривых обжига, полученных численным моделированием, с кривыми обжига из результатов натуральных исследований, проведённых С.П. Онацким), что модель адекватно описывает изменение температур во вращающейся печи по отношению к управляющим воздействиям (мощность горелки  $Q_r$ , загрузка сырца керамзита  $q_3$ , скорость вращения печи  $\omega_n$ ) и возмущению – влажность сырца  $w$ . Величина среднеквадратичного отклонения не превысила 5%.

### **3 МНОГОМЕРНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ОБЖИГА КЕРАМЗИТА**

#### **3.1 Требования к многомерной системе автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита**

В связи с расширением области технологического применения керамзита и диапазонов величин его насыпной плотности  $\rho$  и прочности  $R$  [2,42,86,87], требуется обеспечить стабильность этих значений. Это особенно важно при строительстве дорог, аэродромных покрытий и получении конструкционного керамзитобетона. В связи с этим заводы по производству керамзита должны иметь гибкую технологию перевода режима работы оборудования и, прежде всего процесса обжига во вращающейся печи, обеспечивающую оперативный переход от выпуска керамзита одной марки к выпуску другой.

Существующие методы управления технологическим процессом обжига керамзита не позволяют решить поставленную задачу оптимальным образом, т.к. формирование желаемой кривой обжига представляет собой сложный и нестационарный процесс. Данные методы ориентированы, в основном, на «ручное» управление оператором, что приводит к существенному разбросу параметров  $\rho$  и  $R$  производимого керамзита.

Для производства керамзита необходимых марок с заданными параметрами насыпной плотности и прочности следует, во-первых, выполнить преобразования требуемых физических характеристик керамзита в технологические параметры его производства [37,88-90]. Наиболее информативной характеристикой производства керамзита является кривая его обжига во вращающейся печи [1], в которой в явном виде или опосредованно отражаются как физико-химические свойства исходного сырья, так и особенности конструкции печи и способы воздействия на температурное поле керамзита в этой печи (рис. 1.3). Результаты экспериментальных исследований процесса обжига керамзита позволили установить однозначную связь насыпной плотности и прочностных характеристик керамзита с параметрами кривой обжига [1].

Во-вторых, необходимо синтезировать систему автоматического управления (САУ) технологическим процессом обжига керамзита, обеспечивающую создание в печи желаемого температурного поля (соответствующего требуемой кривой обжига) в условиях ограничений, обусловленных характеристиками сырья и конструкцией печи, и при действии помех на процесс обжига.

Решение второй задачи осложняется тем, что рассматриваемый объект управления имеет распределённые параметры, а используемое до настоящего времени управление односекционной печью ограничено, в основном, двумя воздействиями [6,10,16]: изменением мощности горелки и вариацией загрузки печи для получения лёгкого теплоизоляционного керамзита, что существенно сужает область управления печью.

Поэтому для расширения технологических возможностей печи применительно к поставленной задаче производства высокопрочного керамзита требуется увеличить число управляющих воздействий на печь и синтезировать структуру многомерной системы автоматического управления (МСАУ) технологическим процессом обжига керамзита (ТПОК) [35,59,91,92], ориентированную на обжиг керамзита с требуемыми показателями насыпной плотности и прочности.

В исследованиях, проводившихся институтами НИИСтройкерамика, НИИКерамзит [82], Дальневосточным научно-исследовательским институтом Академии строительства и архитектуры СССР и др., доказано, что одним из основных параметров, определяющим качество лёгкого керамзита, является температура в зоне вспучивания в сечении С (рис. 1.3, кривые 4-6; рис. 2.12). Из зависимостей видно, что изменение температуры на  $15^{\circ}\text{C}$  приводит к изменению объёмного веса примерно на  $150 \text{ кг/м}^3$  и, как следствие, к получению марки керамзита не соответствующей требуемой, при этом прочность изменяется

примерно на 1,5 МПа. Поэтому в [14,82] требуемая точность поддержания температуры задаётся в диапазоне 5°C. В работе [6] рассматривалась система автоматического управления для получения лёгкого керамзита, за счёт управления температурами в двух сечениях А и С, где также задавалось требование точности поддержания температуры около 5°C.

Поэтому потребуем, чтобы синтезируемая в данной работе МСАУ ТПОК для получения прочного керамзита обеспечивала в установившемся режиме отклонение температуры  $\pm 5^\circ\text{C}$  в сечениях F, А и С от заданного значения при известных возмущающих воздействиях. Считаем, что это обеспечит в реальных условиях эксплуатации печи отклонение температуры керамзита не более  $\pm 15^\circ\text{C}$ , обусловленное погрешностями измерительных устройств. Такая точность, одинаковая в трёх сечениях, объясняется основополагающим фактором (глава 1) постепенного нарастания и монотонности кривой обжига (рис. 1.3, кривые 1-3), обеспечивающей набор максимально возможной прочности для требуемой марки.

### **3.2 Отображение прочностных характеристик керамзита в пространстве температурных режимов трёх опорных сечений печи**

Производство керамзита сопряжено с большими затратами энергии, главным образом при его обжиге во вращающейся печи. Основным недостатком применяемых до настоящего времени эвристических алгоритмов управления процессом обжига заключается в том, что производимый в этих условиях керамзит имеет достаточно большой разброс по прочности и насыпной плотности, что соответствует экономически нецелесообразному увеличенному расходу энергии. Один из подходов обеспечения производства керамзита со стабильным значением прочности в условиях снижения энергозатрат заключается в автоматическом согласованном управлении температурой керамзита в трёх сечениях печи. Значения  $T_F$ ,  $T_A$  и  $T_C$  формируют опорные точки кривой обжига,

поэтому назовём сечения F, A и C опорными сечениями печи. Выбор координат этих сечений ориентирован на максимальное использование возможностей управления температурным полем керамзита (в рамках известных ограничений) за счёт изменения мощности газовой горелки  $Q_{г}$ , производительности загрузочного транспортера  $q_з$  и скорости вращения печи  $\omega_{п}$ . Теоретической основой выбора положения рабочей точки синтезируемой МСАУ ТПОК является отображение прочностных характеристик керамзита в пространстве управляемых температурных режимов. Использование этого пространства позволяет осуществить как рациональный выбор комплекса, состоящего из трёх значений температурных режимов в опорных сечениях  $T_F$ ,  $T_A$  и  $T_C$ , так и выполнить задачу анализа эффективности используемых режимов управления печью. Данное обстоятельство создаёт предпосылки для возможности производства керамзита заданной прочности  $R$  и необходимой плотности  $\rho$  с минимумом энергозатрат [36].

В соответствии с предложенным способом [59] обжига керамзита, где управление ТПОК осуществляется тремя системами автоматического управления, каждая из которых замкнута по температуре керамзита в соответствующих сечениях (F, A и C) по оси печи, используя известный допустимый по ГОСТ [42] разброс значений прочности керамзита определённых марок и применяя математический аппарат отображения температурно-прочностной характеристики керамзита в пространстве  $OT_F T_A T_C$  множества управлений процессом обжига [36] (рис. 2.18) построены (с учётом известных технологических ограничений) области (рис. 3.1) допустимых значений прочности  $\Pi_i$  ( $i \in 1, \dots, n$ , где  $n$  – количество возможных стандартных марок керамзита по прочности, производимых печью) в виде параллелепипедов в трёхмерном пространстве  $OT_F T_A T_C$  [40,83]. Здесь объём  $K_i L_i M_i N_i K'_i L'_i M'_i N'_i$  включает в себя бесконечное множество сочетаний значений

вектора  $T_i = [T_{Fi}, T_{Ai}, T_{Ci}]^T$  задающих значений температуры, при которых может быть осуществлено производство керамзита марки  $\Pi_i$ . Требуется найти в этом объёме координаты точки, соответствующие рациональным условиям выпуска керамзита с учётом погрешности САУ.

Известно, что точки  $K_i$  и  $M_i$  этих параллелепипедов принадлежат температурно-прочностной характеристике (3.1) (рис. 2.18) и соответствуют  $\min$  и  $\max$  значению прочности  $R$  в МПа (при сдавливании в цилиндре) для каждой марки  $\Pi_i$  (причём марки  $\Pi_i$  соответствуют маркам по ГОСТ табл. 3.1), а также определённым температурам в сечениях  $F$ ,  $A$  и  $C$ , значения которых являются координатами в пространстве  $OT_F T_A T_C$ .

$$R_i = f_1(T_F, T_A, T_C, w, \gamma), \quad (3.1)$$

здесь  $w$  – влажность сырца,  $\gamma$  – обобщённая характеристика глины.

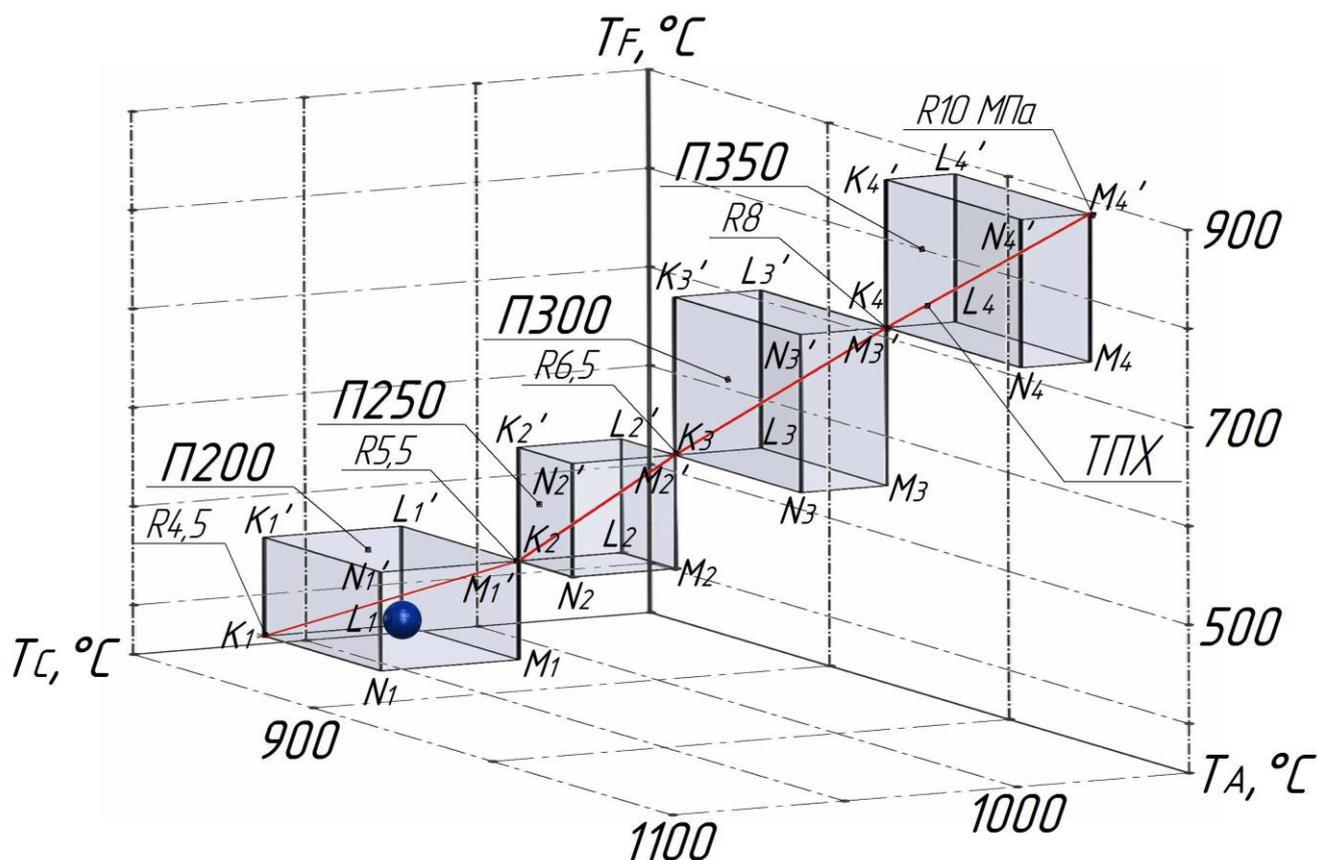
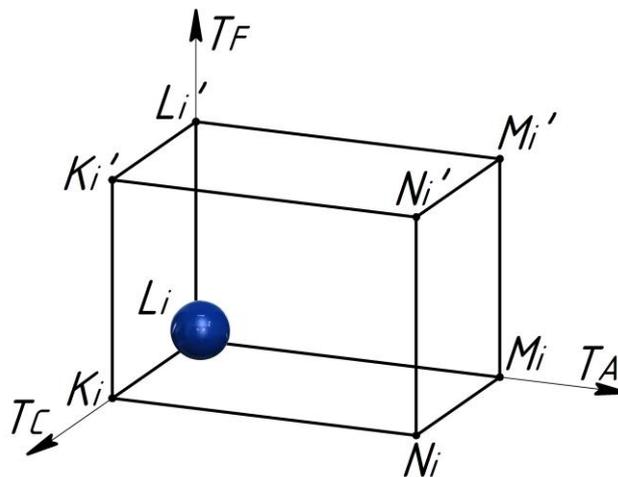


Рисунок 3.1 – Марки керамзита по прочности в пространстве  $OT_F T_A T_C$

Таблица 3.1 – Характеристики керамзита по прочности

Марка по прочности $\Pi_i$	Марка керамзита по прочности (ГОСТ)	Предел прочности при сдавливании в цилиндре, МПа (ГОСТ)
П1	П200	4,5 - 5,5
П2	П250	5,5 - 6,5
П3	П300	6,5 - 8
П4	П350	8 - 10

Проекции между соседними точками в пространстве  $OT_F T_A T_C$  равны длинам рёбер  $i$ -го параллелепипеда. В  $i$ -ом параллелепипеде (рис. 3.2) точка  $L_i$  образуется проекцией точки  $K_i$  на плоскость  $T_F T_A$ , длина ребра  $K_i L_i$  по оси  $T_C$  ограничивается минимально возможным значением температуры  $T_C$  (получаемым, в свою очередь, за счёт уменьшения объёмной тепловой мощности горелки  $Q_G$ ) для марки  $\Pi_i$  согласно температурному режиму в опорном сечении С. Точка  $L'_i$  образуется проекциями точки  $L_i$  вдоль оси  $T_F$  и точки  $M'_i$  вдоль оси  $T_A$ . Длина ребра  $L_i L'_i$  ограничивается максимальным значением температуры в сечении F (получаемым за счёт уменьшения скорости вращения печи  $\omega_p$ ), а длина ребра  $M'_i L'_i$  ограничивается минимальным значением температуры в сечении А (за счёт максимально допустимой загрузки  $q_3$ ) для конкретной марки  $\Pi_i$ . Все остальные рёбра параллелепипеда образуются аналогично путём параллельного переноса известных рёбер в соответствующие точки.

Рисунок 3.2 –  $i$ -ый параллелепипед пространства  $OT_F T_A T_C$

Анализ параллелепипеда показывает, что наиболее экономичному режиму (отвечающему минимальному расходу газа при максимально достижимой производительности печи) соответствует точка  $L_i$ . Это можно пояснить следующим образом. Здесь вспучивание происходит при наименьшем значении  $T_C$  [87], т.е. при минимально допустимом для производства керамзита марки  $\Pi_i$  значении мощности горелки. Кроме того, температура  $T_A$  в точке  $L_i$  имеет минимально возможное значение [43,47], что соответствует (в соответствии со способом [59] регулирования  $T_C$ ) максимально допустимой для  $\Pi_i$  загрузке  $q_3$  сырца в печь. И, наконец, скорость  $\omega_n$  вращения печи, которая, при прочих равных условиях, существенно определяет [33-35] температуру  $T_F$  и в точке  $L_i$  имеет максимально возможное для керамзита марки  $\Pi_i$  значение. Два последних фактора определяют максимально достижимую производительность, а первый – минимум расхода энергии.

Соединяя точки  $L_i$  четырёх параллелепипедов получаем энергоэффективную температурно-прочностную характеристику (3.2) (рис. 3.1) позволяющую получить керамзитовый гравий требуемой марки по прочности с рациональным расходом энергоресурсов

$$R_2 = f_2 (T_{Fr}, T_{Ap}, T_{Cp}, w, \gamma), \quad (3.2)$$

здесь  $T_{Fr}, T_{Ap}, T_{Cp}$  – рациональные значения температур  $T_F, T_A, T_C$ .

Поскольку система автоматического управления работает с определённой погрешностью, то для перемещения по ТПХ целесообразно использовать не точку, а сферу (рис. 3.1, 3.2).

### **3.3 Структурный синтез многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита**

Исходя из вышеизложенного, синтезирована обобщённая структура МСАУ ТПОК (рис. 3.3), где объектом управления является процесс обжига керамзита, который характеризуется вектором температуры в трёх точках кривой обжига

$\bar{X} = [T_F, T_A, T_C]^T$ . Задатчик формирует по заданному значению  $R_{тр}$  желаемую кривую обжига в виде заданных значений температуры керамзита в сечениях F, A и C в форме вектора  $\bar{X}_y = [T_{F3}, T_{A3}, T_{C3}]^T$  управляющих воздействий на три взаимосвязанные системы управления скоростью  $\omega_n$  вращения печи, загрузкой печи сырьем  $q_3$  и тепловой мощностью горелки  $Q_r$ .

Выходные значения регуляторов системы  $R_{11}$ ,  $R_{22}$ ,  $R_{33}$  формируют управляющие воздействия на исполнительные устройства – электропривод вращения печи, электропривод загрузки и электропривод горелки соответственно, которые представлены в системе звеньями  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$ . Блоками  $OC_1$ ,  $OC_2$  и  $OC_3$  обозначены устройства измерения температуры. Блоком  $OC_R$  обозначен отбор проб керамзита для измерения его прочности в лаборатории с последующим внесением корректировок в задатчик.

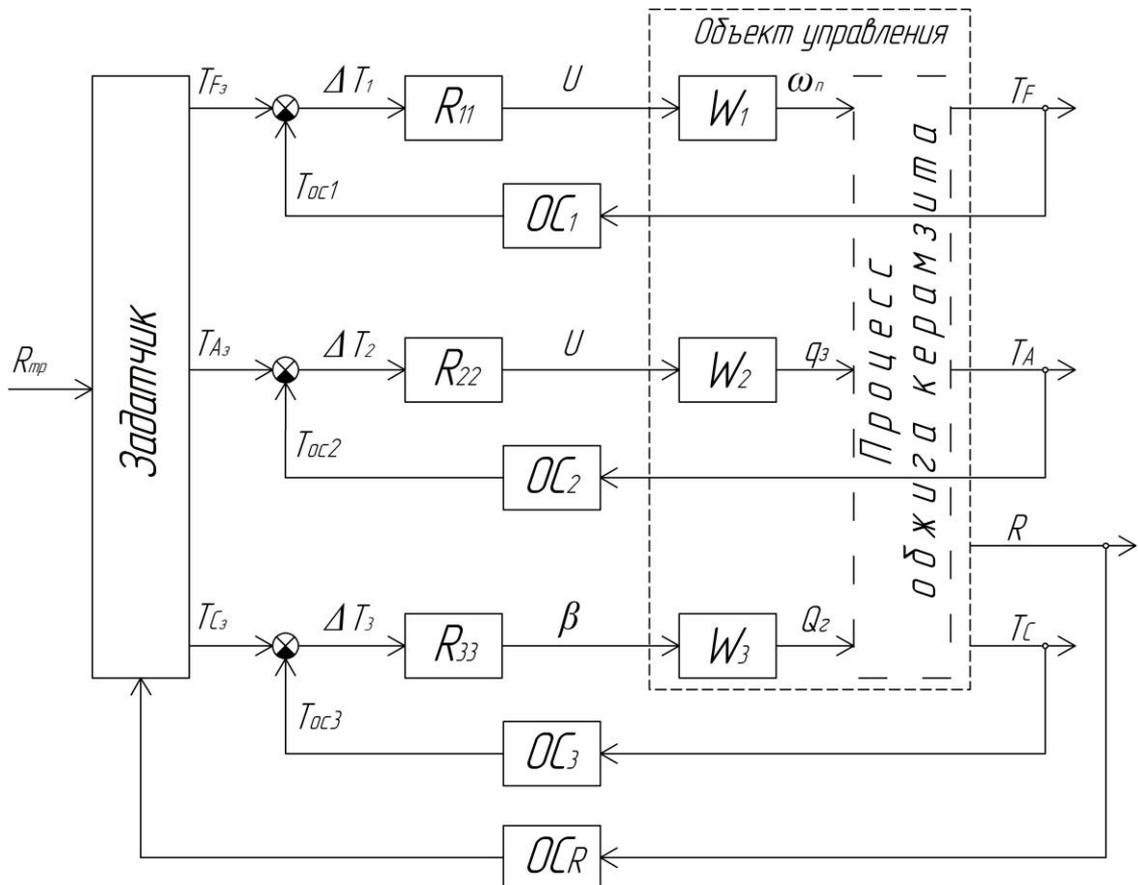


Рисунок 3.3 – Обобщённая структура многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита

Результаты экспериментальных исследований [1] и моделирования [10,34] температурного поля в печи при обжиге керамзита позволили найти множество  $G$

нелинейных зависимостей температуры поля  $T_F$ ,  $T_A$ ,  $T_C$ , плотности  $\rho$  и прочности  $R$  в выбранных сечениях от режимов работы горелки  $Q_G$ , загрузки печи  $q_3$ , скорости вращения  $\omega_{п}$ , обобщённого показателя свойств глины  $\gamma_i$   $i$ -го месторождения и влажности глины  $w$ :

$$\left. \begin{aligned} \rho &= f_1 (T_F, T_A, T_C, q_3, Q_G, \gamma_i, \omega_{п}, w) \\ R &= f_2 (T_F, T_A, T_C, q_3, Q_G, \gamma_i, \omega_{п}, w) \\ T_F &= f_3 (\omega_{п}, q_3, Q_G, w, \gamma_i) \\ T_A &= f_4 (q_3, \omega_{п}, Q_G, w, \gamma_i) \\ T_C &= f_5 (Q_G, \omega_{п}, q_3, w, \gamma_i) \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Для решения практической задачи автоматического управления ТПОК необходимо найти значения задающих сигналов (в их качестве выступают заданные значения температур  $T_{F3}$ ,  $T_{A3}$ ,  $T_{C3}$ ) из решения нелинейной системы уравнений (3.3). Разработан алгоритм цифрового задающего устройства (рис. 3.4), формирующего вектор задающих сигналов  $\bar{X}_y = [T_{F3}, T_{A3}, T_{C3}]^T$ , который позволяет накапливать массив данных о требуемых сочетаниях прочности  $R$  и насыпной плотности  $\rho$ . После накопления данных корректируются температуры  $T_{F3}$ ,  $T_{A3}$ ,  $T_{C3}$  через индивидуальный показатель конкретной глины  $\gamma_i$ , который, в основном, определяется её химическим составом. В результате корректировки значений трёх задаваемых температур повышается соответствие получаемой прочности керамзита требуемой, производимого из конкретной глины. При этом появляется возможность переключения между задаваемыми параметрами для разных типов схожих глин, что повышает их прочность и уменьшает брак в виде керамзита не той марки.

Запуск и работа МСАУ ТПОК включает в себя определённую последовательность действий, поэтому разработан алгоритм работы МСАУ ТПОК в пространстве температурных параметров кривой обжига керамзита заданной прочности на основе взаимосвязанного управления электроприводами (рис. 3.5), который обеспечивает последовательность осуществления соответствующих технологических этапов для стабильной работы МСАУ ТПОК. Его практическое применение ориентировано на производство керамзита заданной прочности  $R$  с

погрешностью не более 5%. Начальные этапы 1-11 (рис. 3.5) алгоритма включают подготовительные операции по пуску вращающихся печей при производстве керамзита. Последующие этапы 12-26 (рис. 3.5) представляют собой поочерёдное включение каналов МСАУ ТПОК.

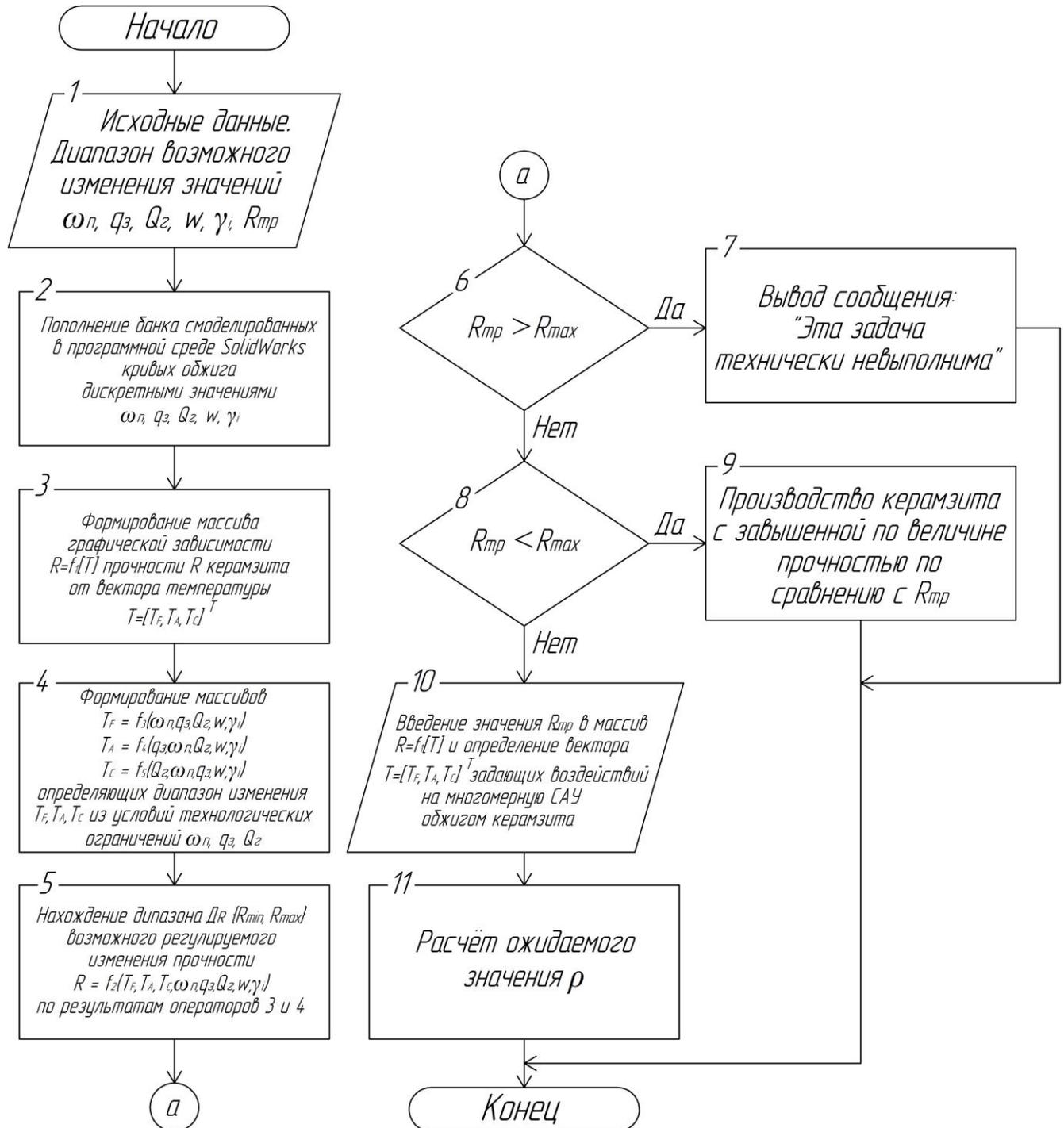


Рисунок 3.4 – Алгоритм цифрового задающего устройства

МСАУ ТПОК с требуемыми показателями качества

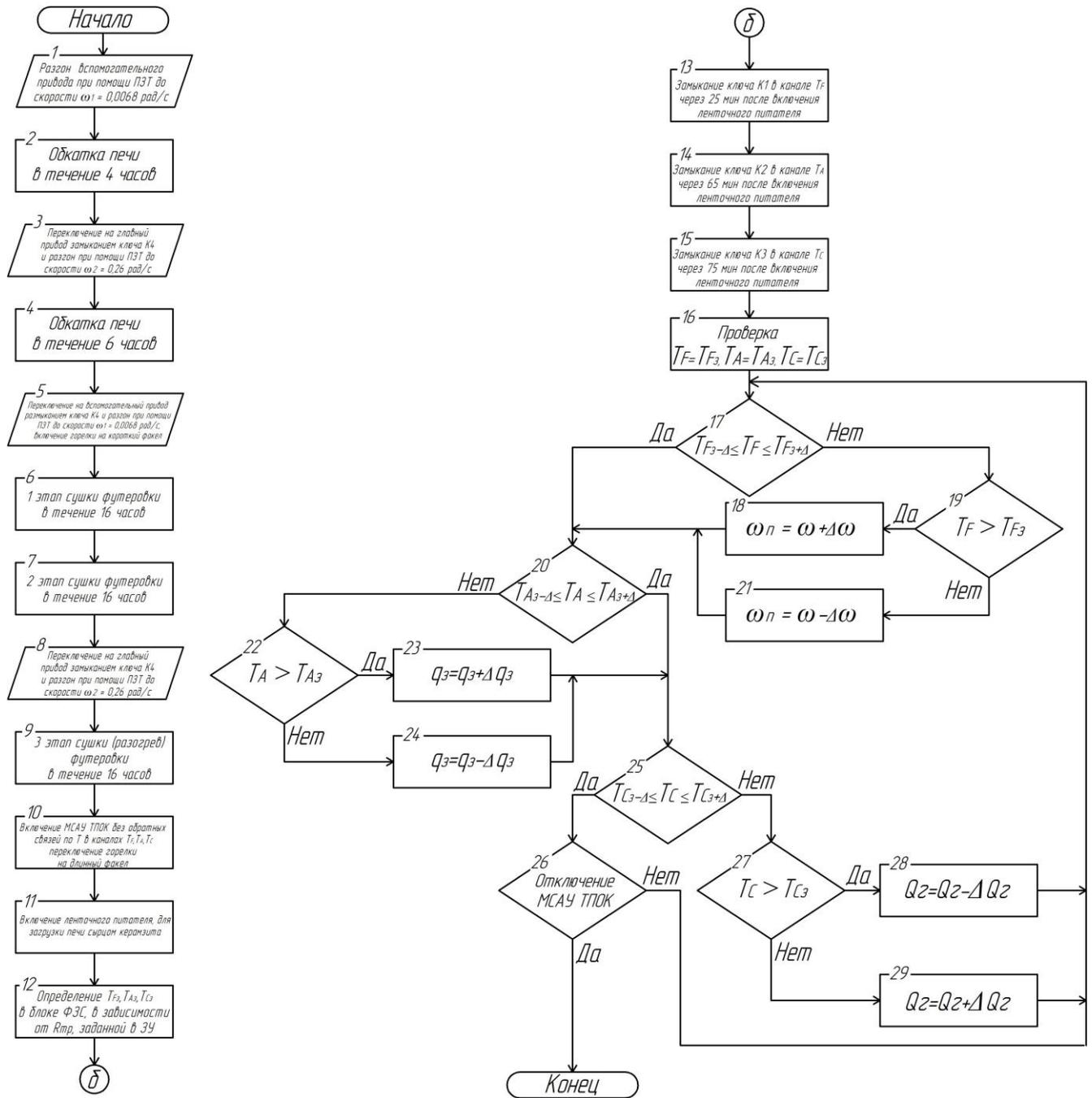


Рисунок 3.5 – Алгоритм работы МСАУ ТПОК

Вопросам по созданию систем управления многомерными объектами управления посвящено значительное количество работ [6,16,27-30,33,93-100], в частности, в работах [6,16] исследовалось вспучивание керамзита во вращающейся печи с целью снижения его насыпной плотности. Основываясь на их анализе считаем целесообразным синтезировать МСАУ ТПОК в виде трёх замкнутых (по температуре керамзита T<sub>F</sub>, T<sub>A</sub> и T<sub>C</sub>, соответственно в сечениях F, A и C) систем автоматического управления (рис. 3.6) [39]. Для управления многомерной системой

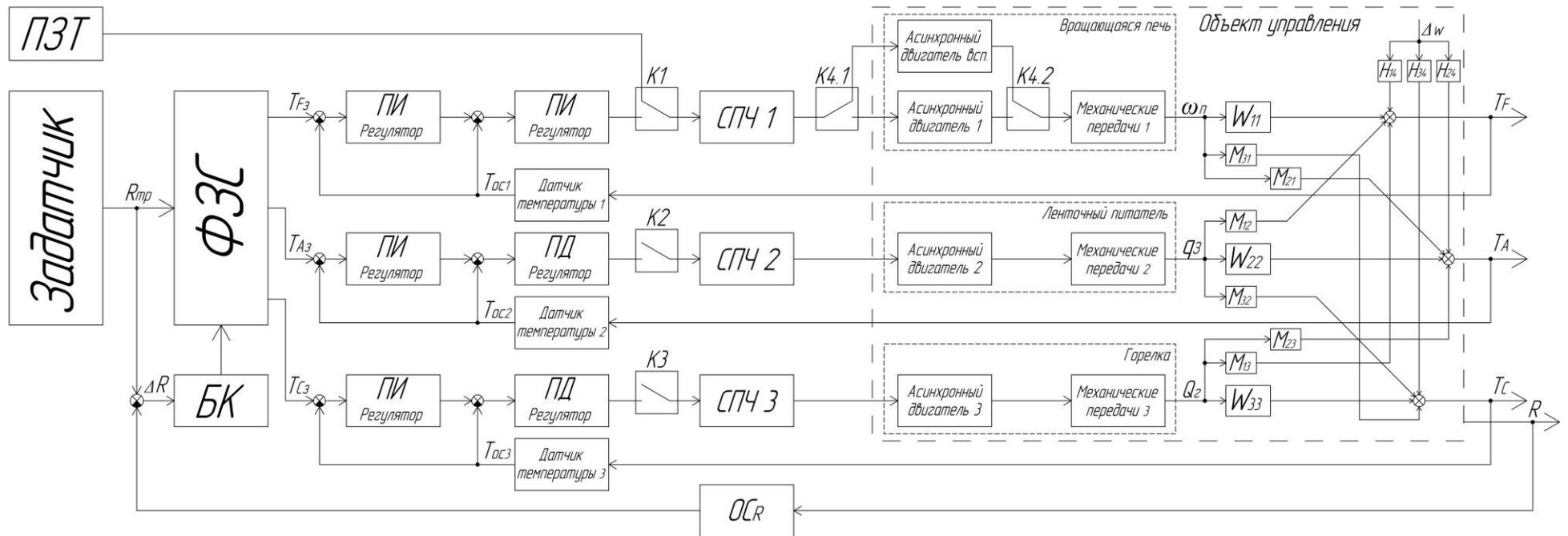


Рисунок 3.6 – Структура многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита

используется формирователь вектора задающих сигналов (ФЗС) [101], в котором используется алгоритм [83] выбора его элементов – значение температур  $T_{F3}$ ,  $T_{A3}$ ,  $T_{C3}$ . Задающим устройством ЗУ определяется желаемая величина требуемой прочности  $R_{тр}$ . Необходимые изменения в ФЗС осуществляются блоком коррекции (БК) по величине отклонения  $\Delta R$ . Программный задатчик траектории (ПЗТ) определяет скорость и время разгона вспомогательного и главного приводов вращающейся печи.

Для уменьшения влияния вариаций параметров объекта управления и его межканальных связей на показатели качества управления системы считаем необходимым синтезировать каждую из трёх систем управления ТПОК в виде многоконтурной системы с одной измеряемой координатой (МСОИК) [93]. Преимущество МСОИК заключается в использовании одного датчика в цепи обратной связи, который измеряет выходную координату объекта управления и подаёт преобразованный сигнал на инверсные входы последовательно включенных регуляторов. При синтезе регуляторов применяется метод компенсации регулятором последующего контура наибольшей постоянной времени предыдущего замкнутого контура, с настройкой регуляторов на максимально возможное быстродействие при монотонности переходного процесса. Эффективность такого подхода для управления двумерным объектом (за счёт регулирования температур в сечениях А и С путём изменения загрузки  $q_3$  и мощности горелки  $Q_r$ ) показана в работе [6], а также в ряде работ, посвящённых автоматизации нестационарных объектов [102-105].

Для согласования аналоговой и цифровой частей МСАУ ТПОК необходимо использовать цифро-аналоговый и аналого-цифровой преобразователи. Опишем их безынерционными звеньями с коэффициентами передачи [106]:

$$k_{ЦАП} = \frac{U_{ЦАП}}{2^m - 1} = \frac{10}{2^{10} - 1} = 9,8 \cdot 10^{-3} \frac{В}{имп}, \quad (3.4)$$

$$k_{АЦП} = \frac{2^m - 1}{U_{ЦАП}} = \frac{2^{10} - 1}{10} = 102,0408 \frac{имп}{В}, \quad (3.5)$$

где  $m$  – разрядность выходного кода преобразователя.

### 3.4 Моделирование программной траектории задатчика скорости

#### электропривода вращающейся печи в пусковых и переходных режимах

Для осуществления технологического перехода обжига керамзита с одной марки по прочности на другую необходимо изменять, кроме всего прочего, скорость вращения печи. Известно, что переходные процессы изменения скорости движения электромеханической системы при различных сочетаниях её параметров, определяющих её динамические свойства, и различном характере изменения управляющих воздействий протекают по-разному, т.е. переход от одного состояния системы к другому может совершаться по различным траекториям, отличающимся длительностью перехода, максимальными нагрузками электрической и механической части системы, потерями энергии, проявляющимися в двигателе за время перехода, потреблением энергии за то же время и другими показателями. Из множества возможных траекторий при управлении электроприводом необходимо стремиться выбирать такие, которые обеспечивают максимальное быстродействие, минимум потерь энергии и динамических нагрузок, максимум совершаемой полезной работы и оптимальные значения других показателей, характеризующих условия протекания процесса [75, 107].

Величиной, характеризующей плавность протекания переходного процесса, является рывок – первая производная от ускорения или момента  $q = da/dt = dM/dt$ , либо вторая производная от скорости  $q = d\omega^2/dt^2$  [26,75,108-110], при этом ускорение  $a = d\omega/dt$ , где  $\omega = \omega_{дв}$  – скорость двигателя. На рисунке 3.7 представлены оптимальные траектории по критерию обеспечения быстродействия при ограничении ускорения (вращающего момента) и рывка (скорости изменения вращающего момента), которые в приводах с упругими связями и зазорами в механических передачах уменьшают динамические нагрузки, обусловленные упругими колебаниями [107].

В связи с этим, для ограничения токов, момента и динамического удара в приводе во время пуска и технологического перехода на обжиг керамзита другой марки, предлагается использование программного задатчика, вычислительная модель которого создана в MATLAB Simulink (рис. 3.8), аналогичный подход применялся в ряде работ [103-105]. Для формирования программных траекторий задаются – требуемая скорость двигателя  $\omega$ , ограничения ускорения  $a$  и рывка  $q$ .

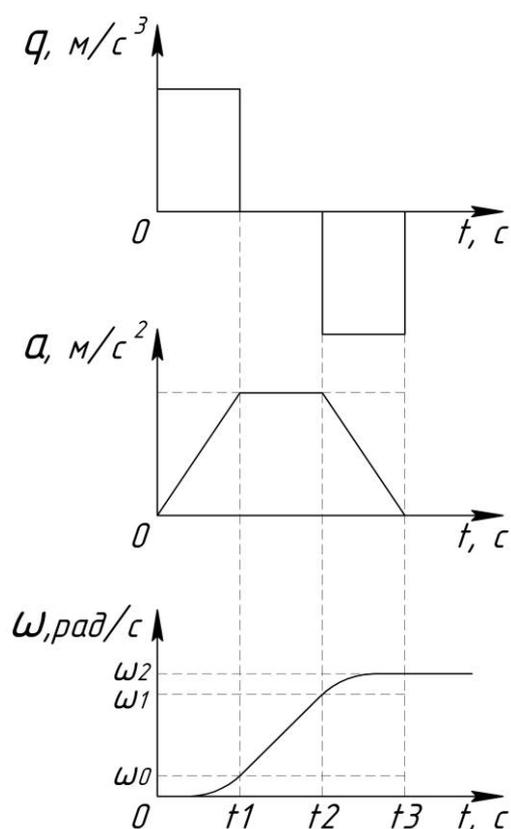


Рисунок 3.7 – Оптимальные траектории, обеспечивающие минимальные динамические нагрузки

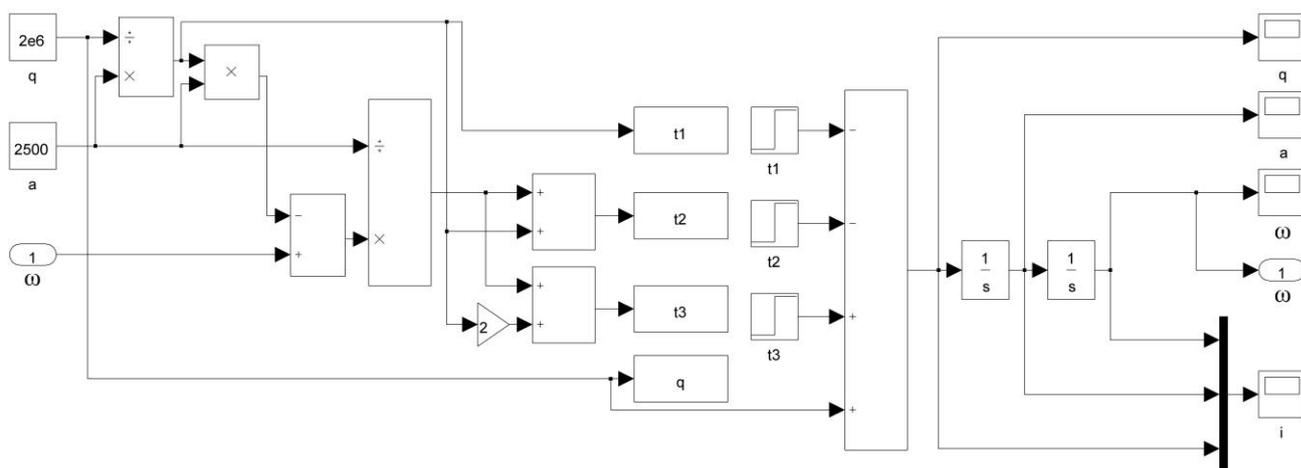


Рисунок 3.8 – Вычислительная модель программного задатчика

Программная траектория задающего сигнала (рис. 3.9) описывается системой уравнений (3.6) и состоит из следующих участков:

- $0 - t_1$  – величина рывка поддерживается постоянной;
- $t_1 - t_2$  – величина ускорения поддерживается постоянной;
- $t_2 - t_3$  – величина рывка поддерживается постоянной;
- $t_3$  – скорость остается постоянной.

$$\left. \begin{aligned}
 \omega_0 &= \frac{a \cdot t_1}{2}, \\
 t_1 &= \frac{a}{q}, \\
 t_{12} &= t_1 + \frac{\omega_2 - 2 \cdot \omega_0}{a}, \\
 \omega_1 &= \omega_0 + a \cdot t_{12}, \\
 t_2 &= t_1 + \frac{2 \cdot \omega_0 - a \cdot t_1}{a}, \\
 t_3 &= 2 \cdot t_1 + \frac{2 \cdot \omega_0 - a \cdot t_1}{a}.
 \end{aligned} \right\} (3.6)$$

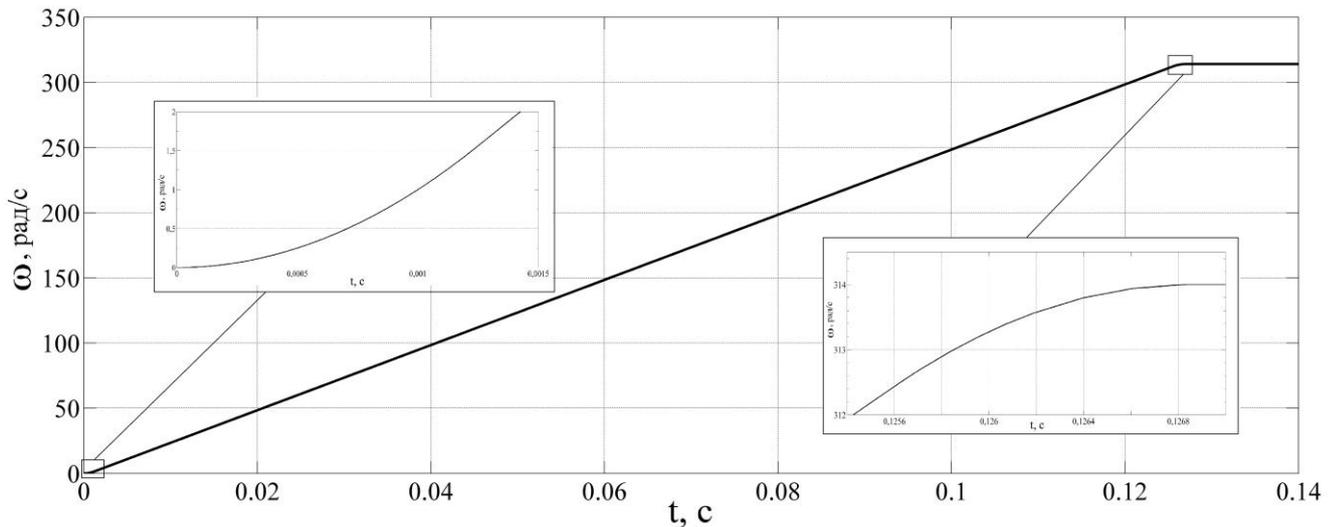
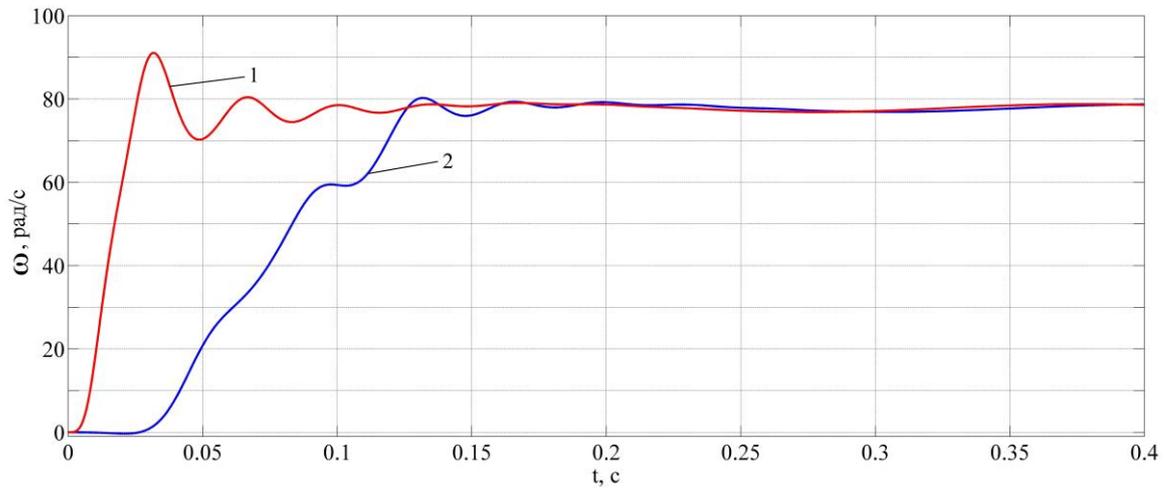


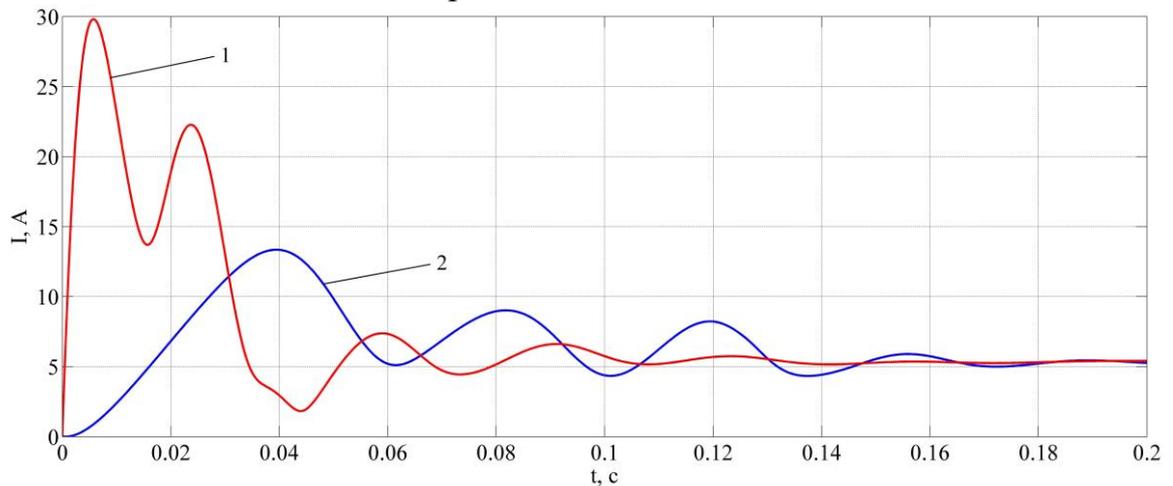
Рисунок 3.9 – Программная траектория задающего сигнала

Для уменьшения динамических ударов вследствие действия упругих связей и пусковых токов на вспомогательном двигателе применён программный задатчик (рис. 3.8) траектория сигнала которого представлена на рисунке 3.9. Ограничения рывка и ускорения в задатчике настраивались по принципу обеспечения минимально возможного пускового тока и момента. Время разгона двигателя в данном технологическом процессе не существенно, поскольку на вспомогательном двигателе печь вращается 4-6 часов, но, тем не менее, оно ограничено возможностью преодоления момента трения (особенно в зимнее время) и статического момента. На вход электропривода с задатчиком и без него подавалась частота  $\omega = 314$  рад/с.



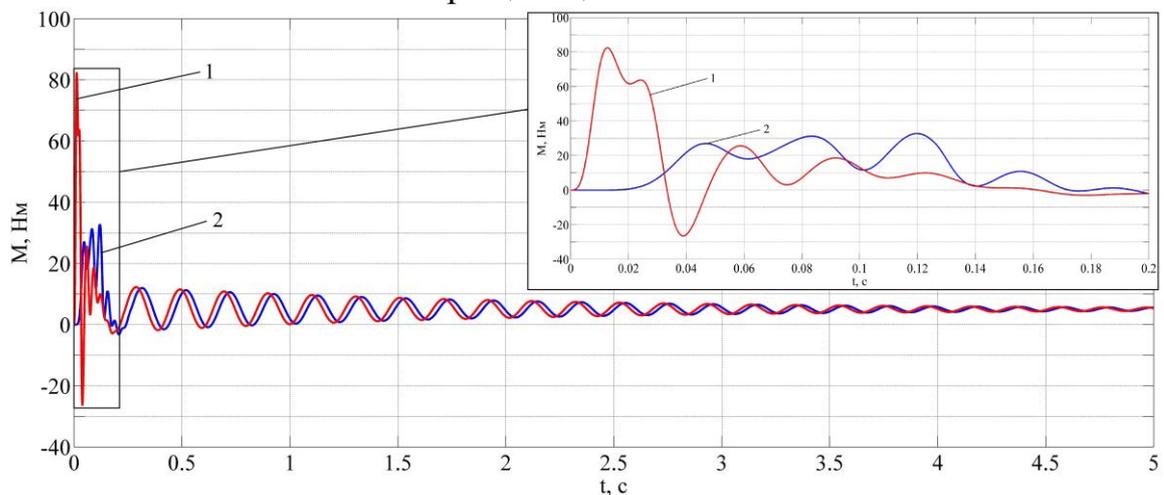
1 – скачкообразный задатчик, 2 – программный задатчик

Рисунок 3.10 – Скорость вспомогательного асинхронного электропривода вращающейся печи



1 – скачкообразный задатчик, 2 – программный задатчик

Рисунок 3.11 – Ток вспомогательного асинхронного электропривода вращающейся печи

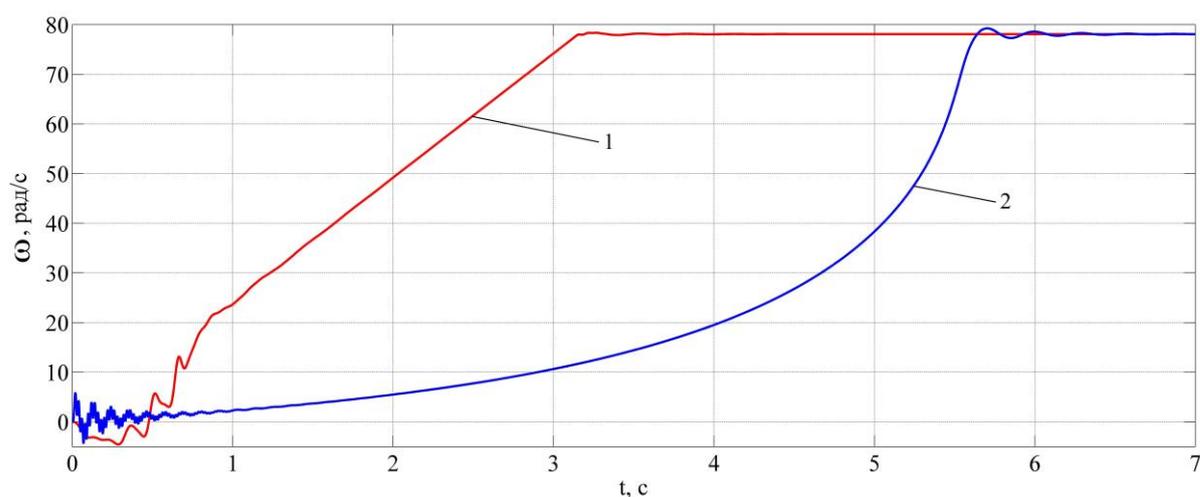


1 – скачкообразный задатчик, 2 – программный задатчик

Рисунок 3.12 – Электромагнитный момент вспомогательного асинхронного электропривода вращающейся печи

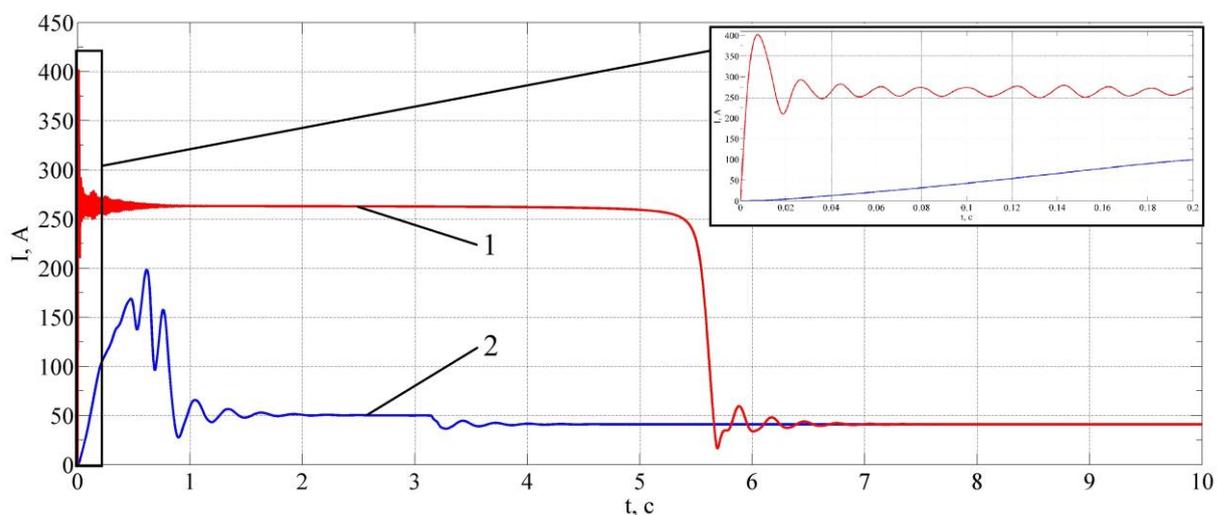
В результате, применение программного задатчика позволило снизить максимальную величину пускового тока с 30А до 13А (рис. 3.11), величину момента – с 82 Нм до 32 Нм (рис. 3.12). Также уменьшилась общая амплитуда колебаний (рис. 3.10 – 3.12) скорости, тока и момента, что показывает эффективность применения данного подхода.

Для главного привода вращающейся печи также применён программный задатчик, при этом на вход электропривода с задатчиком и без него подавалась частота  $\omega = 314$  рад/с.



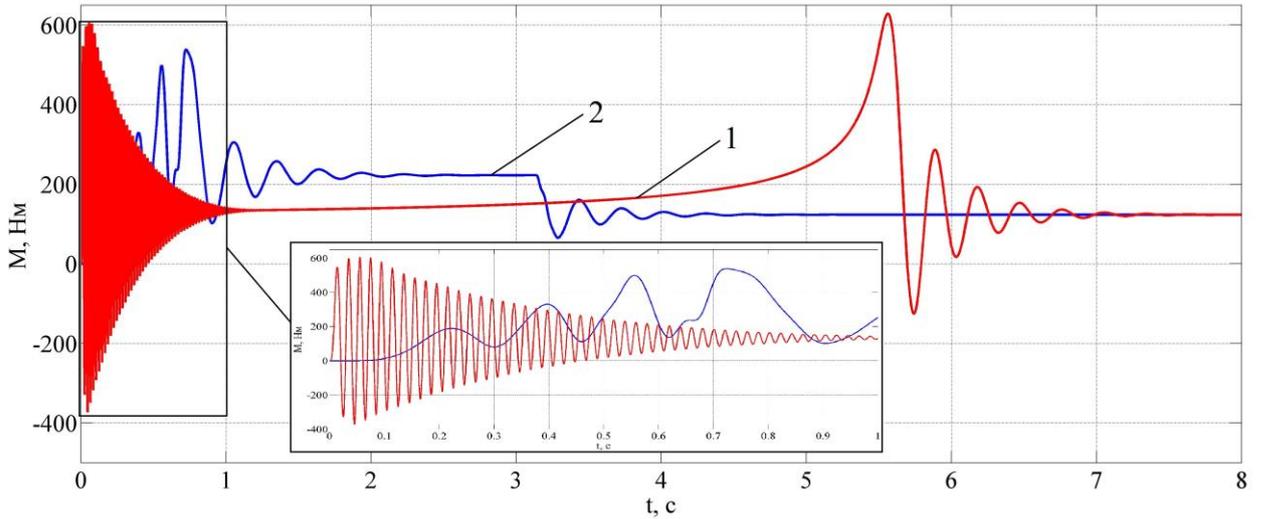
1 – скачкообразный задатчик, 2 – программный задатчик

Рисунок 3.13 – Скорость главного асинхронного электропривода вращающейся печи



1 – скачкообразный задатчик, 2 – программный задатчик

Рисунок 3.14 – Ток главного асинхронного электропривода вращающейся печи



1 – скачкообразный задатчик, 2 – программный задатчик

Рисунок 3.15 – Электромагнитный момент главного асинхронного электропривода вращающейся печи

Анализ полученных графиков (рис. 3.13 – 3.15) показывает, что в результате применения программного задатчика время переходного процесса по скорости увеличилось с 3с до 5,5с (рис. 3.13), при этом максимальная величина тока (рис. 3.14) снизилась вдвое с 400А до 200А и пришла к номинальному значению через 1с, тогда как при прямом пуске длительность тока величиной 250А составляет 5,5с. Значительно уменьшилась частота колебаний момента двигателя, а следовательно и количество динамических ударов. Момент достигает номинального установившегося значения через 3,5 с, при этом максимальная величина достигает 540 Нм вместо 610 Нм.

С целью стабилизации скорости главного привода и последующего создания системы управления, замкнём обратную связь по скорости (рис. 3.16). Замкнутый контур включает в себя И-регулятор, преобразователь частоты и непосредственно асинхронный привод.

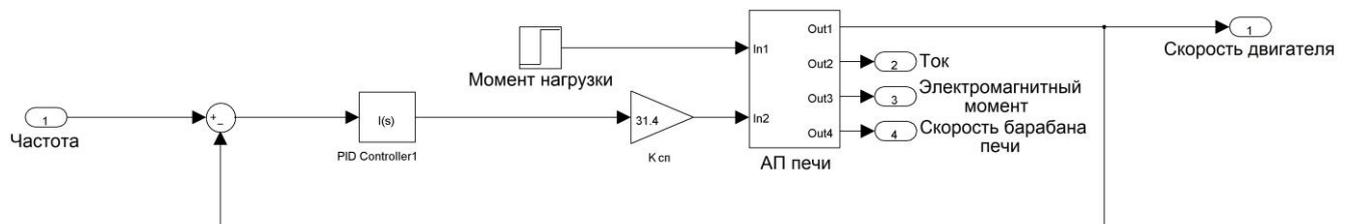
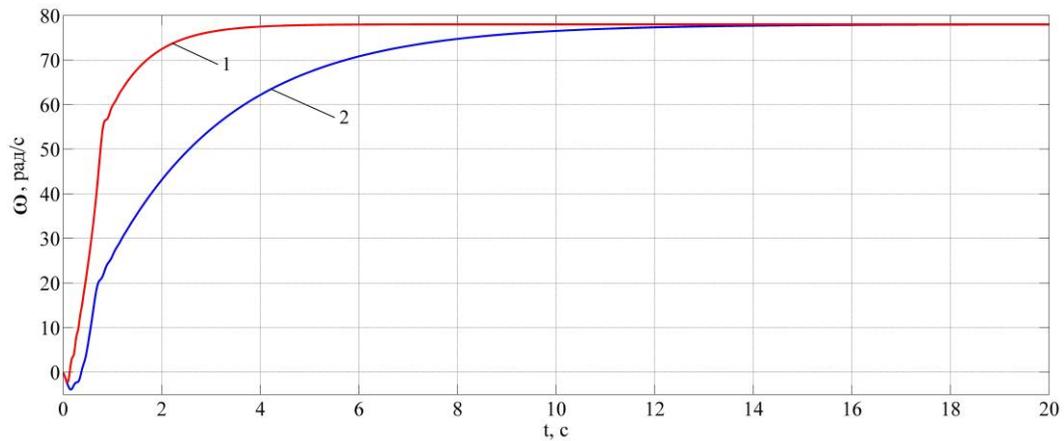


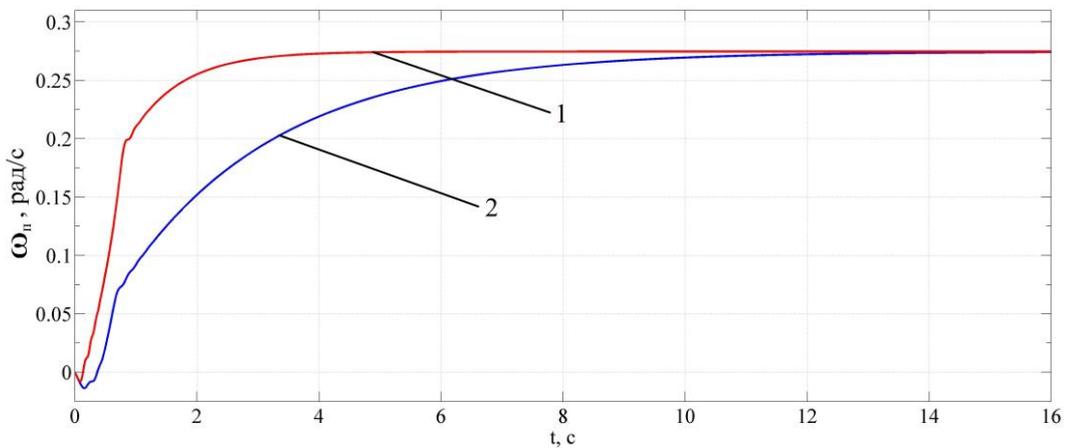
Рисунок 3.16 – Вычислительная модель замкнутого контура трёхмассового асинхронного привода

На вход замкнутого контура электропривода подавалась угловая частота  $\omega = 78$  рад/с, значение которой эквивалентно выходной скорости двигателя после настройки регулятора. На рисунках 3.17 и 3.18 представлены графики изменения скорости двигателя и вращающейся печи соответственно.



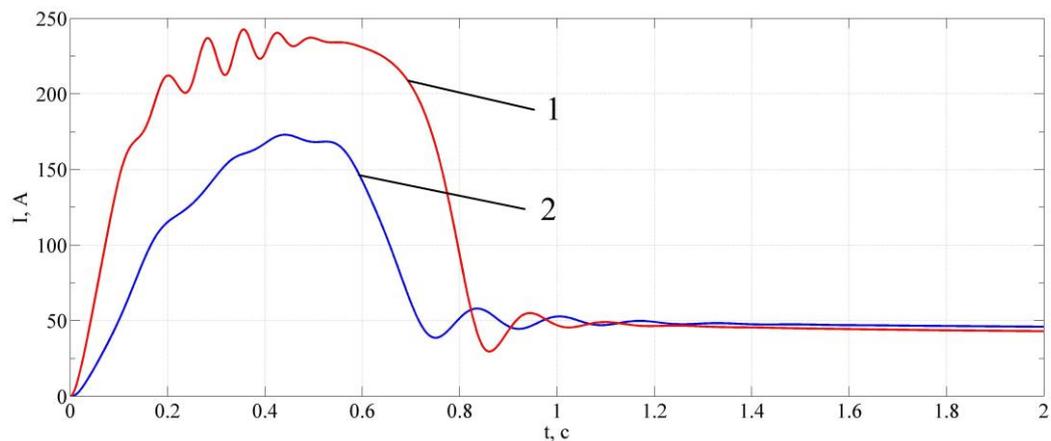
1 – скачкообразный задатчик, 2 – программный задатчик

Рисунок 3.17 – Скорость главного асинхронного электропривода вращающейся печи



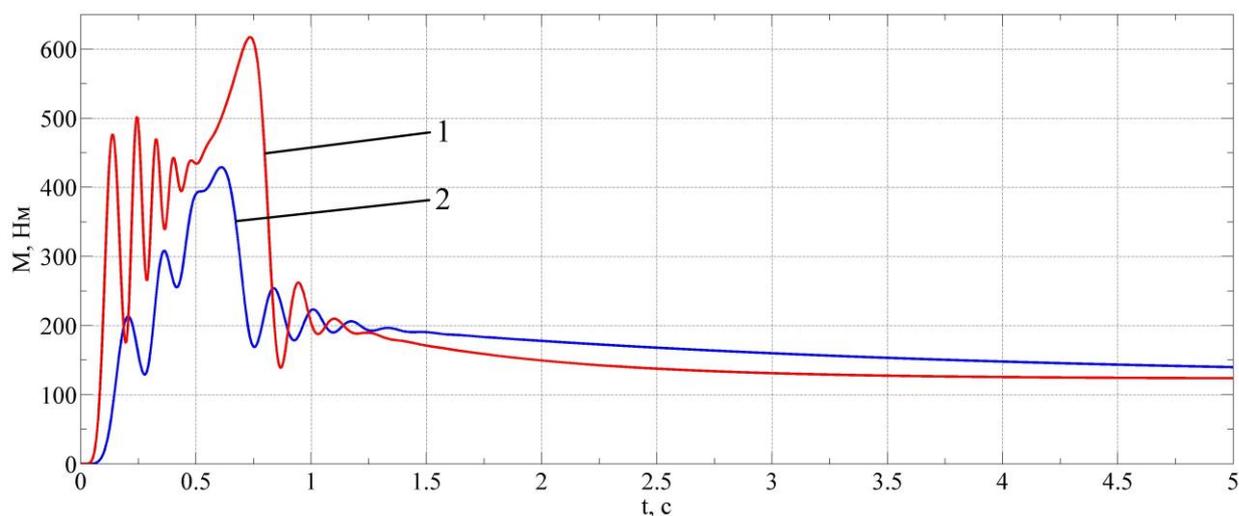
1 – скачкообразный задатчик, 2 – программный задатчик

Рисунок 3.18 – Скорость вращающейся печи



1 – скачкообразный задатчик, 2 – программный задатчик

Рисунок 3.19 – Ток главного асинхронного электропривода вращающейся печи



1 – скачкообразный задатчик, 2 – программный задатчик

Рисунок 3.20 – Электромагнитный момент главного асинхронного электропривода вращающейся печи

Анализ графиков (рис. 3.17, 3.18) показывает, что время переходного процесса увеличилось с 3 с до 10 с, но, как было сказано выше, данный аспект не оказывает влияние на протекание технологического процесса обжига керамзита. Максимальная величина тока снизилась в 1,5 раза, с 248А до 170А (рис. 3.19), в 3 раза уменьшилась частота колебаний момента двигателя (рис. 3.20), а, следовательно, и величина динамических ударов, при этом максимальная величина момента составляет 420 Нм вместо 610 Нм.

Для оценки переходных режимов осуществлён технологический переход с марки по прочности керамзита П200 на марку П350. Для этого построена вычислительная модель (рис. 3.21) с использованием модели главного трёхмассового асинхронного привода (рис. 4.14). На вход электропривода, с задатчиком и без него, в момент времени  $t = 20$ с подавалось приращение угловой частоты  $\omega = 40$  рад/с.

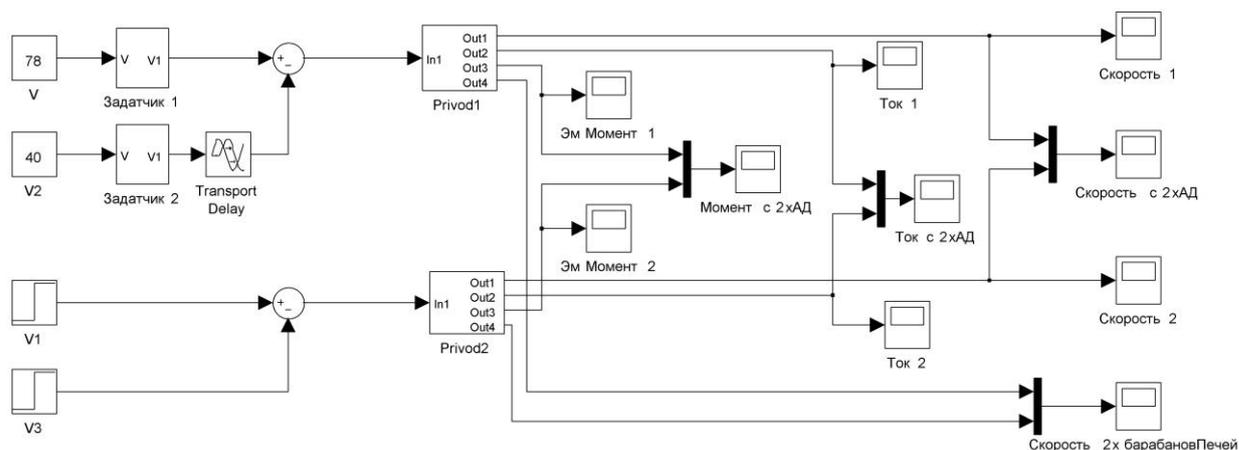
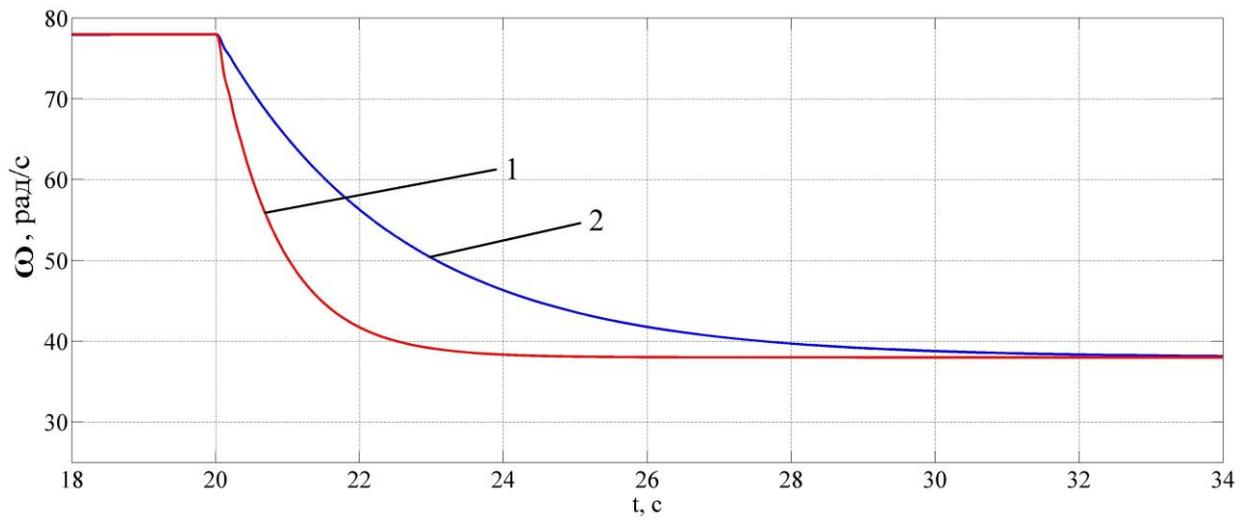
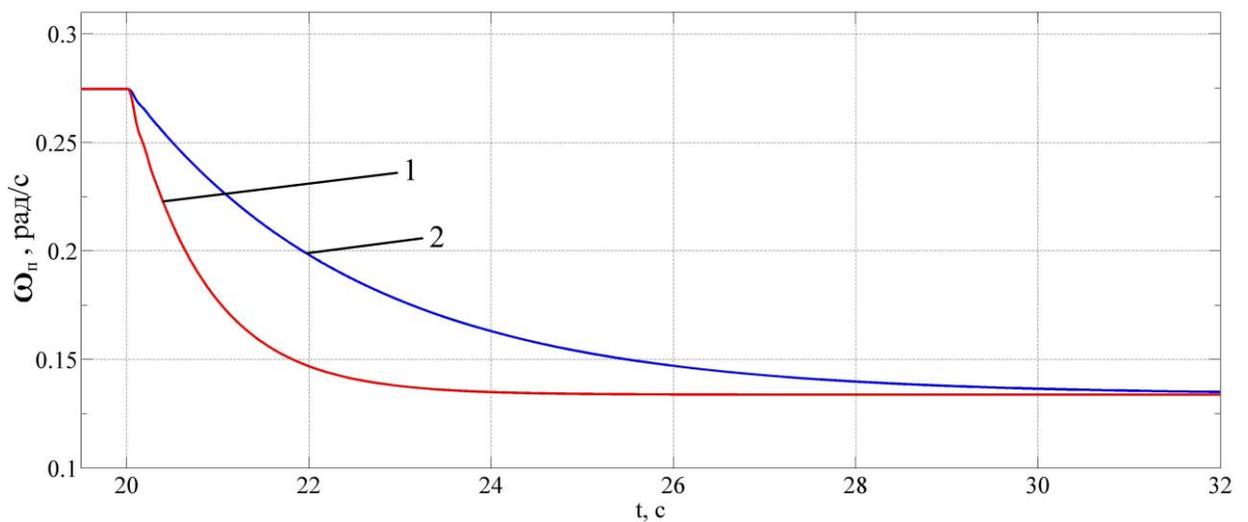


Рисунок 3.21 – Вычислительная модель электроприводов с программным и скачкообразным задатчиками



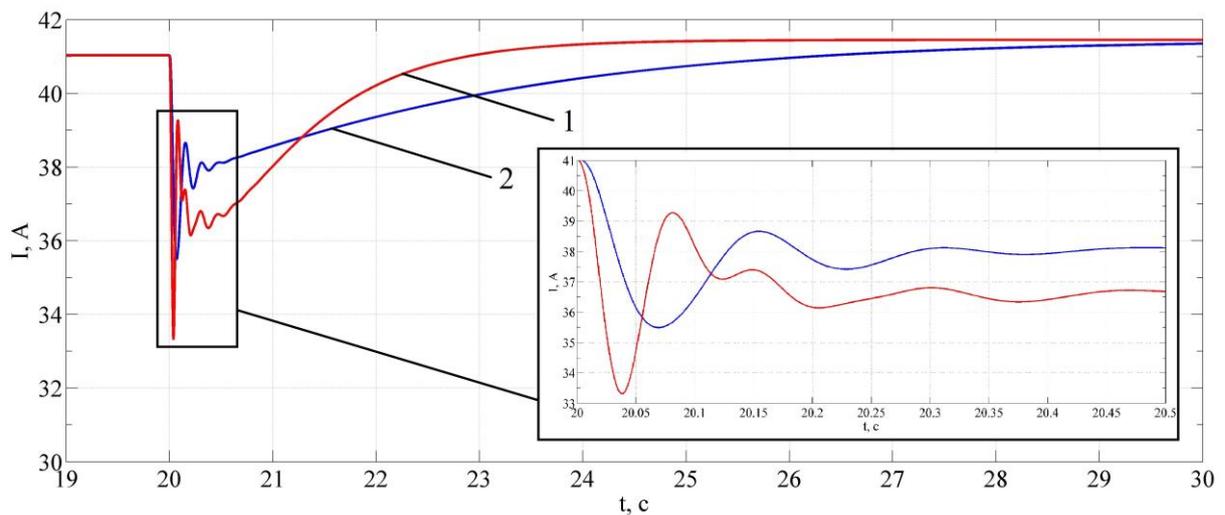
1 – скачкообразный задатчик, 2 – программный задатчик

Рисунок 3.22 – Скорость главного асинхронного электропривода вращающейся печи



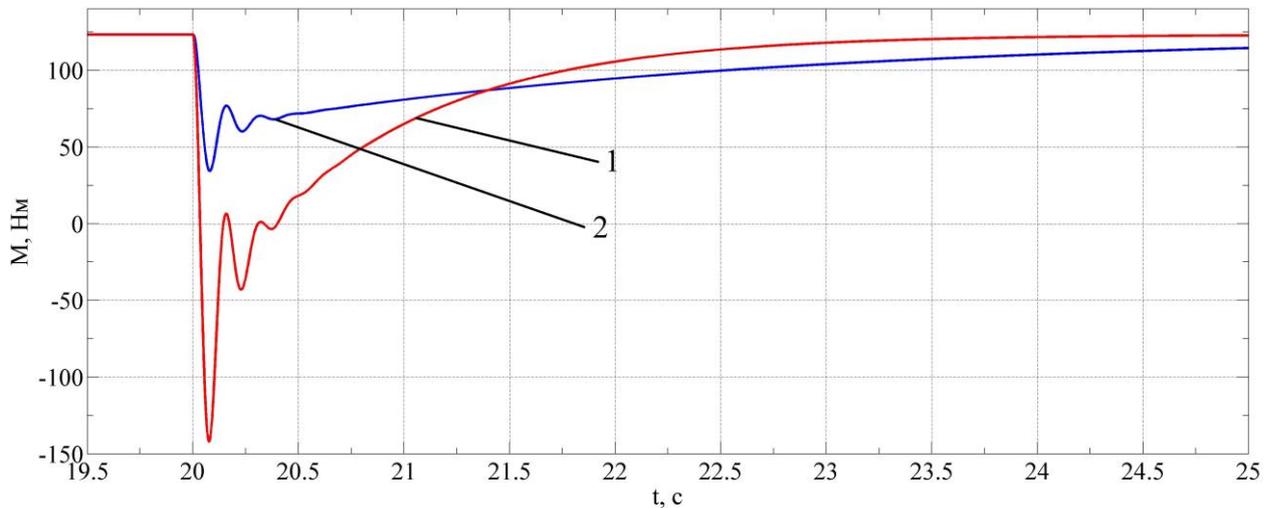
1 – скачкообразный задатчик, 2 – программный задатчик

Рисунок 3.23 – Скорость вращающейся печи



1 – скачкообразный задатчик, 2 – программный задатчик

Рисунок 3.24 – Ток главного асинхронного электропривода вращающейся печи



1 – скачкообразный задатчик, 2 – программный задатчик

Рисунок 3.25 – Электромагнитный момент асинхронного электропривода

Анализ полученных результатов показывает, что время переходного процесса (рис. 3.22, 3.23) увеличилось с 2,5 с до 7 с, что несущественно, поскольку технологический процесс обжига керамзита протекает для марки П200 – 40 мин, а для марки П350 – 80 мин. Динамический провал по току (рис. 3.24) снизился на 2,3А, а динамический провал по моменту (рис. 3.25) сократился в 3 раза, с 265 Нм до 90 Нм.

Результаты численного моделирования полученные на математических моделях вспомогательного и главного привода доказывают эффективность применения программного задатчика для снижения динамических ударов при действии упругих связей и снижении токов, влияющих на перегрев двигателя и срок его эксплуатации, на этапах пуска и технологического перехода при производстве разных керамзита.

### **3.5 Устойчивость многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита**

Во время протекания технологического процесса обжига керамзита изменяются физико-химические свойства сырца керамзита. Также в зависимости от требуемой марки изменяется величина его загрузки и продолжительность обжига путём изменения скорости вращения печи. Поэтому, для оценки робастной устойчивости САУ в канале F с параметрической неопределенностью объекта управления используем графический критерий устойчивости Цыпкина-Поляка [111,112], базирующийся на теореме Харитонова.

Поскольку постоянная времени объекта управления превышает как минимум в 100 раз постоянные времени асинхронных двигателей в каналах F, A и C, то опишем их безынерционными звеньями.

В МСАУ ТПОК характеристическому полиному замкнутой системы сепаратного канала стабилизации температуры в сечении F (рис. 3.26) с параметрической неопределенностью

$$F(p) = a_0 + a_1 \cdot p + a_2 \cdot p^2 + a_3 \cdot p^3 \quad (3.7)$$

соответствует номинальный полином

$$F_0(p) = a_0^0 + a_1^0 \cdot p + a_2^0 \cdot p^2 + a_3^0 \cdot p^3, \quad (3.8)$$

где  $a_i^0$  – коэффициенты номинального полинома,  $a_i^0 = \frac{\bar{a}_i + \underline{a}_i}{2}$ ,  $i \in 0, 1 \dots 3$ ; здесь  $\bar{a}_i$ ,  $\underline{a}_i$  – наименьшее и наибольшее значения коэффициентов  $a_i$  характеристического полинома замкнутой системы. Размах  $\alpha_i$  коэффициентов  $a_i$ , находящихся в интервале  $[\underline{a}_i, \bar{a}_i]$ ,  $\alpha_i = \frac{\bar{a}_i - \underline{a}_i}{2}$ .

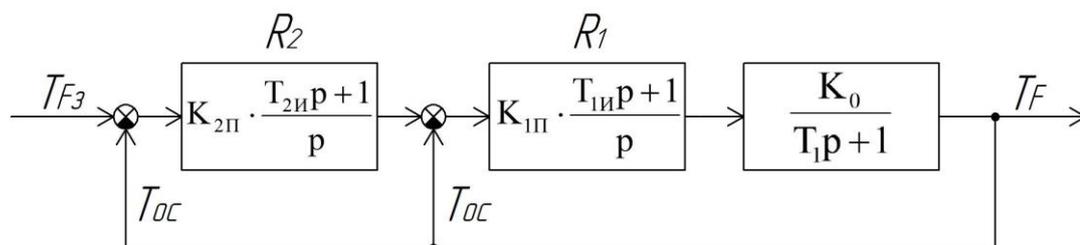


Рисунок 3.26 – Система стабилизации температуры в канале F с линейризованной моделью асинхронного привода

На рисунке 3.26  $K_0 = K_{спч} \cdot K_{ап} \cdot K_{оу} \cdot K_{дт}$ ;  $K_{спч}$ ,  $K_{ап}$ ,  $K_{оу}$ ,  $K_{дт}$  – коэффициенты силового преобразователя частоты, асинхронного привода, объекта управления и датчика температуры соответственно.

Для канала стабилизации температуры в сечениях F найдены значения коэффициентов характеристического полинома, номинального полинома и размаха коэффициентов (табл. 3.2).

Таблица 3.2 – Параметры интервального полинома САУ в канале F

	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
$\underline{a}_i$	1	1105	$5,84 \cdot 10^5$	$8,24 \cdot 10^7$
$\bar{a}_i$	1	1100	$3,68 \cdot 10^5$	$3,73 \cdot 10^7$
$a_i^0$	1	1102,5	$4,76 \cdot 10^5$	$5,99 \cdot 10^7$
$\alpha_i$	0	2,5	$1,08 \cdot 10^5$	$2,26 \cdot 10^7$

В соответствии с графическим критерием Цыпкина-Поляка для робастной устойчивости необходимо и достаточно чтобы выполнялись условия  $a_0^0 > \gamma \cdot \alpha_0$ ,  $a_n^0 > \gamma \cdot \alpha_n$  (для САУ в канале F –  $\gamma_{\max} = 2,65$ ) и годограф Цыпкина-Поляка  $Z(\omega) = X(\omega) + jY(\omega)$ ,  $0 \leq \omega \leq \infty$  при изменении  $\omega$  от 0 до  $\infty$ , проходил последовательно через  $n$  квадрантов против часовой стрелки и не пересекал квадрата с вершинами  $(\pm\gamma_{\max}, \pm\gamma_{\max})$ , где  $X(\omega) = \frac{U_0(\omega)}{R(\omega)}$ ,  $Y(\omega) = \frac{V_0(\omega)}{T(\omega)}$ ;  $U_0(\omega)$ ,  $V_0(\omega)$  – вещественная и мнимая части номинальной АФЧХ  $F_0(j\omega) = U_0(\omega) + j\omega V_0(\omega)$ ;  $U_0(\omega) = a_n^0 - a_{n-2}^0\omega^2 + a_{n-4}^0\omega^4 - \dots$ ,  $V_0(\omega) = a_{n-1}^0\omega - a_{n-3}^0\omega^3 + a_{n-5}^0\omega^5 - \dots$ ;  $R(\omega)$ ,  $T(\omega)$  – вещественная и мнимая части границы двумерного образа  $S(\omega)$  множества значений интервальной АФЧХ  $F(j\omega)$  по вещественной оси  $R(\omega) = \alpha_n^0 + \alpha_{n-2}^0\omega^2 + \alpha_{n-4}^0\omega^4 + \dots$ , по мнимой оси  $T(\omega) = \alpha_{n-1}^0\omega + \alpha_{n-3}^0\omega^3 + \alpha_{n-5}^0\omega^5 + \dots$ .

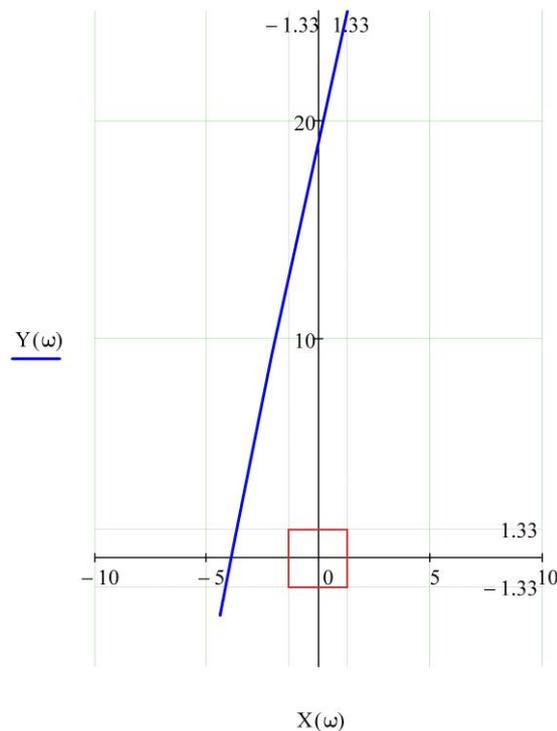


Рисунок 3.27 – Годограф Цыпкина-Поляка для САУ стабилизации температуры в сечении F

Анализ полученного годографа  $Z(\omega)$  показывает, что при изменении  $\omega$  от 0 до  $\infty$  годограф САУ в канале F (рис. 3.27) последовательно проходит через 3 квадранта против часовой стрелки и не пересекает стороны вписанного квадрата

$\gamma_{\max} = 2,65$ , что соответствует выполнению условия устойчивости. Следовательно, САУ в канале F синтезированной МСАУ ТПОК обладает робастной устойчивостью в условиях параметрической неопределенности объекта управления.

Поскольку САУ в каналах А (рис. 3.28) и С (рис. 3.29) МСАУ ТПОК содержат запаздывание, то их устойчивость определим по частотному критерию Найквиста при крайних значениях запаздывания  $\tau$  и коэффициентов  $K$  (табл. 2.6, 2.5). Согласно критерию Найквиста система считается устойчивой тогда и только тогда, когда годограф  $L(j\omega)$  не охватывает точку  $(-1j; 0)$ .

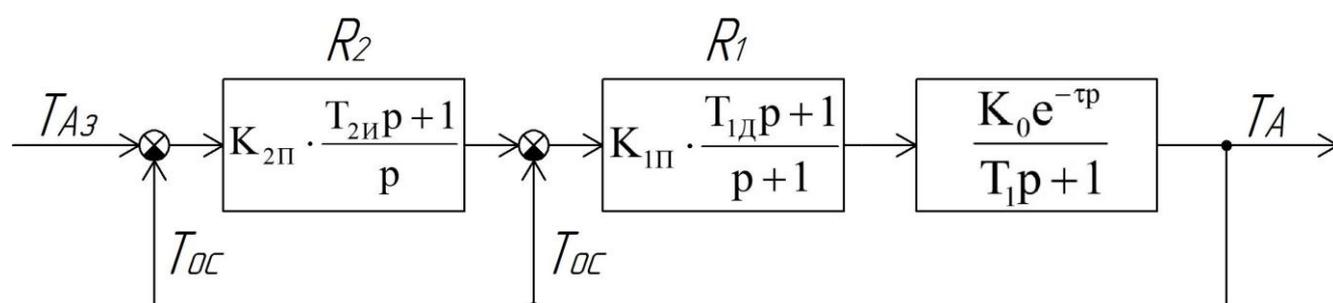


Рисунок 3.28 – Система стабилизации температуры в канале А

Пропорциональная составляющая ПД регулятора первого контура МСОИК канала А:  $K_{1П} = \frac{K_p}{K_0}$ , где  $K_0 = K_{спч} \cdot K_{ад} \cdot K_{лп} \cdot K_{оу} \cdot K_{дт}$ ;  $K_{лп}$ ,  $K_{ад}$  – коэффициенты ленточного питателя и асинхронного двигателя соответственно.

Для обеспечения устойчивости  $K_{1П} \leq 0,026$ , соответственно коэффициент разомкнутой системы  $K_p = 0,5$ .

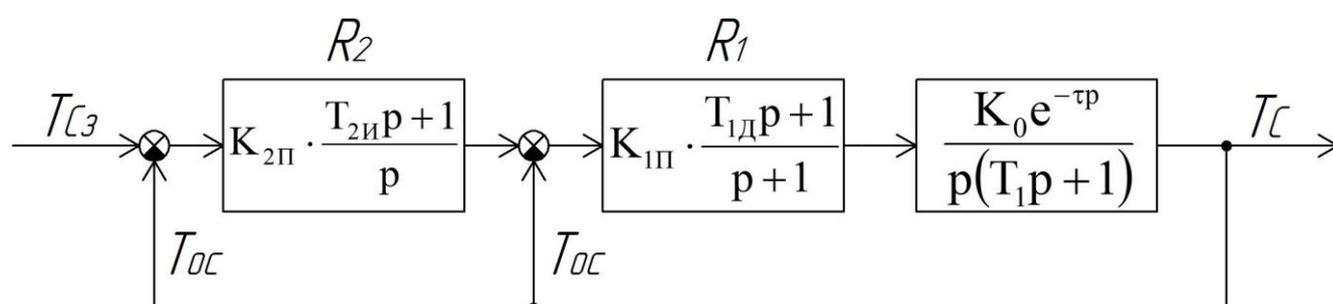


Рисунок 3.29 – Система стабилизации температуры в канале С

Пропорциональная составляющая ПД регулятора первого контура МСОИК канала С:  $K_{1П} = \frac{K_p}{K_0}$ , где  $K_0 = K_{спч} \cdot K_{ад} \cdot K_{г} \cdot K_{ред} \cdot K_{оу} \cdot K_{дт}$ ;  $K_{г}$ ,  $K_{ред}$  – коэффициенты горелки и редуктора горелки соответственно.

Для обеспечения устойчивости  $K_{1П} \leq 0,195$ , соответственно  $K_p = 0,005$ .

В программной среде Mathcad [113,114] построены годографы Найквиста для САУ в каналах А и С (рис. 3.30, 3.31) соответственно.

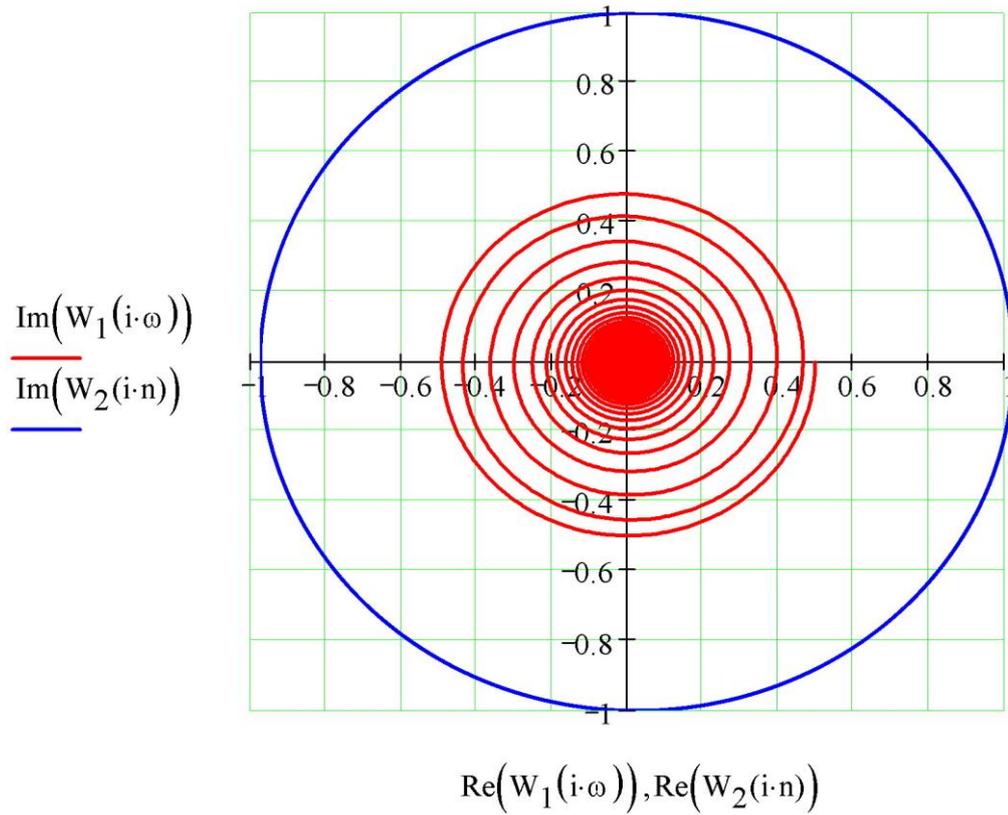


Рисунок 3.30 – Годограф Найквиста для САУ температурой в канале А

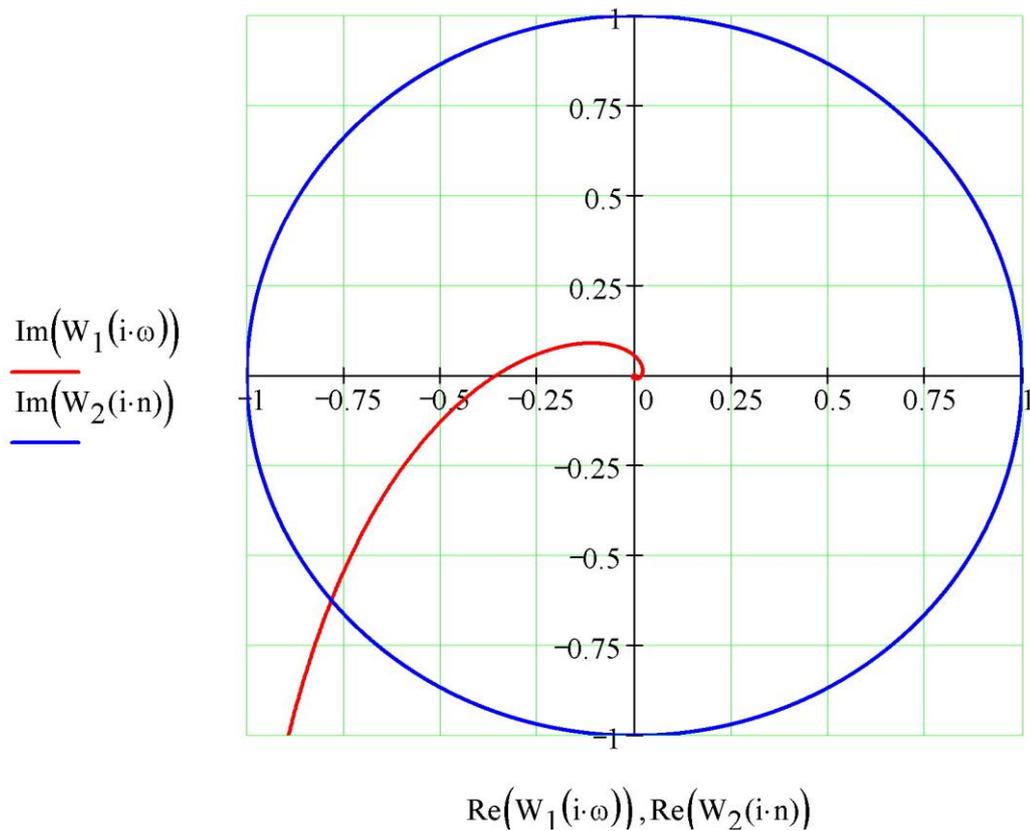


Рисунок 3.31 – Годограф Найквиста для САУ температурой в канале С

Анализ полученных годографов  $L(j\omega)$  (рис. 3.30, 3.31) показывает, что при изменении  $\omega$  от 0 до  $\infty$  они не охватывают точку с координатами  $(-1j; 0)$ , следовательно САУ в каналах А и С МСАУ ТПОК устойчивы.

Проведено численное моделирование МСАУ ТПОК (глава 4, пункт 4.4) по оценке влияния межканальных связей, показавшее, что эти связи оказывают положительный эффект позволяя сокращать время технологического перехода между марками керамзита по прочности, установлено, что влияние межканальных связей в объекте на сепаратные каналы управления отрабатывается этими сепаратными каналами МСАУ ТПОК за время  $500 \div 2500$ с, но при этом величина динамического выброса  $\gamma = 0,95^\circ\text{C} \div 8,75^\circ\text{C}$ , что составляет всего  $1 \div 9\%$  по сравнению с величинами управляющих воздействий в сепаратных каналах.

### **3.6 Оценка влияния квантования на динамику цифровых систем автоматического управления вращающейся печью, ленточным питателем и газовой горелкой**

При синтезе цифровых систем управления МСАУ ТПОК вращающейся печи (канал F), ленточным питателем (канал А) и газовой горелкой (канал С) предполагается, что при их работе выполняется теорема Котельникова-Шеннона и их можно рассматривать как квазинепрерывные [95]. Оценим влияние квантования цифровых ЭВМ на динамику этих систем. С этой целью дополним в программной среде MATLAB вычислительные модели синтезированных САУ блоками квантования по уровню в прямом канале и квантования по времени в цепи обратной связи (рис. 3.32, 3.34, 3.36), заменив при этом аналоговые регуляторы на цифровые.

Поскольку квантование по уровню осуществляется в модуле ввода-вывода цифровой ЭВМ, в данном случае это АЦП выбранного контроллера, то величина шага квантования составит  $9,8 \cdot 10^{-3}$  В/имп. Установим эту величину в блок квантования по уровню.

Квантование по времени в цифровой части системы осуществляется с шагом дискретизации  $T_k$ , величина которого определяется временем вычислительных операций по исполнению алгоритма программной реализации регуляторов и задатчика в контроллере, ограниченным мощностью его процессора.

Целью данного численного моделирования является определение минимальной частоты замыкания ключа и, соответственно, определение наибольшего периода квантования  $T_k$ , при которой цифровая САУ может рассматриваться как квазинепрерывная.

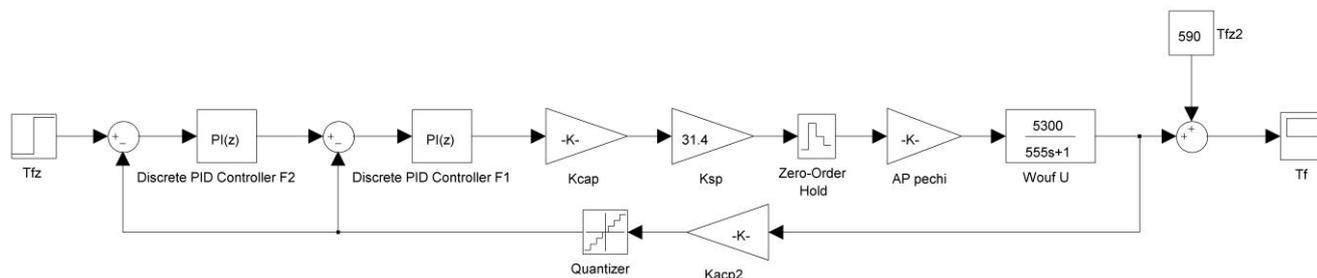


Рисунок 3.32 – Вычислительная модель цифровой САУ вращающейся печью

Для определения максимального шага дискретизации на вход вычислительной модели САУ вращающейся печью (рис. 3.32) в установившемся режиме подавался сигнал с задатчика. При этом параметры блока квантования по времени изменялись в интервале от 0,1с до 250с. При сравнении переходных процессов (рис. 3.33) непрерывной и цифровой систем управления вращающейся печью было установлено, что при шаге дискретизации  $T_k = 200$ с (частота замыканий ключа 0,005 Гц) в системе начинают возникать колебания температуры, а при частоте замыкания  $T_k = 250$ с система становится неустойчивой. При  $T_k = 1$ с (частота замыканий ключа 1 Гц) систему можно считать квазинепрерывной.

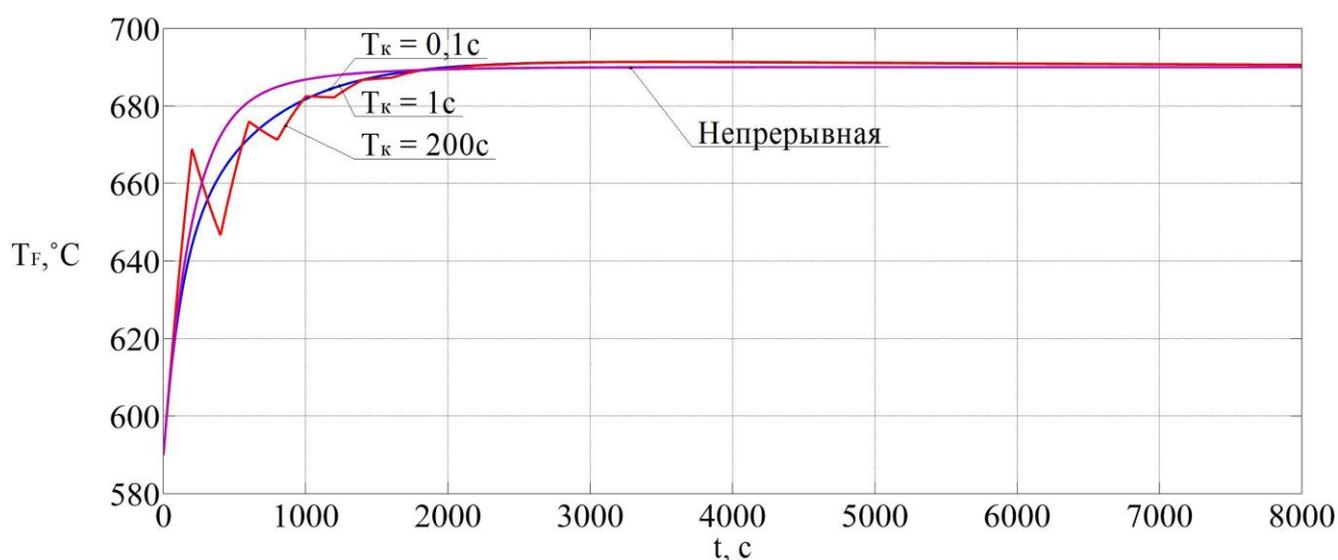


Рисунок 3.33 – Сравнение переходных процессов в непрерывной и цифровой САУ вращающейся печью

Для определения максимального шага дискретизации на вход вычислительной модели САУ ленточным питателем (рис. 3.34) в установившемся режиме подавался сигнал с задатчика.

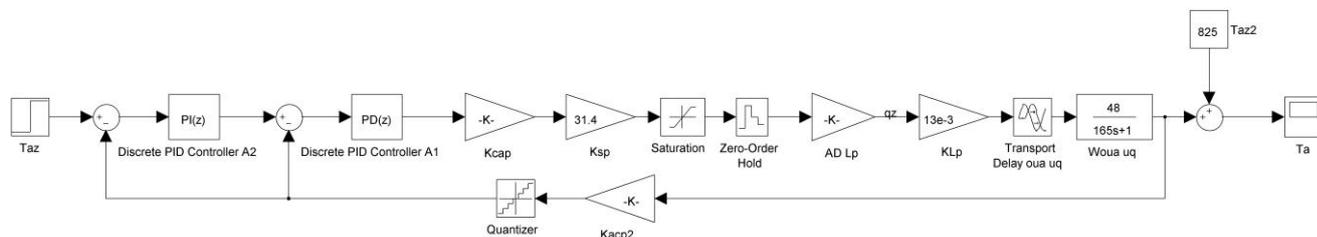


Рисунок 3.34 – Вычислительная модель цифровой САУ ленточным питателем

При этом параметры блока квантования по времени изменялись в интервале от 0,1с до 10000с. При сравнении переходных процессов (рис. 3.35) непрерывной и цифровой систем управления ленточным питателем было установлено, что при шаге дискретизации  $T_k = 1000с$  (частота замыканий ключа 0,001 Гц) в системе начинают возникать колебания температуры, а при частоте замыкания  $T_k = 10000с$  статическая ошибка превышает 50%. При  $T_k = 1с$  (частота замыканий ключа 1 Гц) систему можно считать квазинепрерывной.

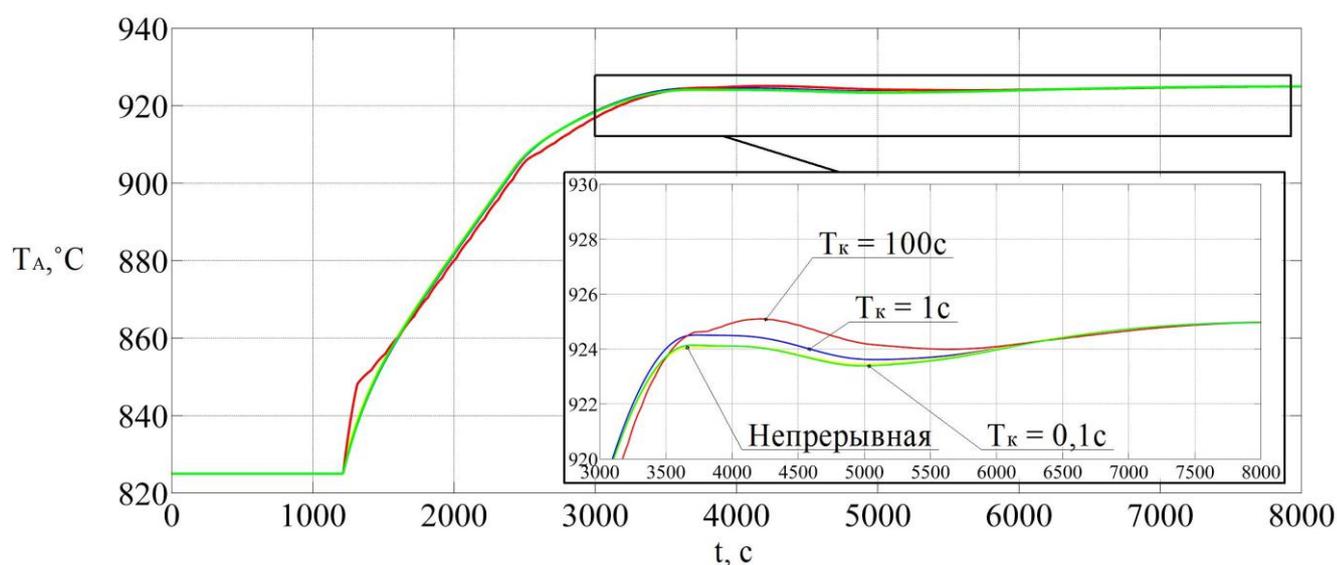


Рисунок 3.35 – Сравнение переходных процессов в непрерывной и цифровой САУ ленточным питателем

Для определения максимального шага дискретизации на вход вычислительной модели САУ газовой горелкой (рис. 3.36) в установившемся режиме подавался сигнал с задатчика.

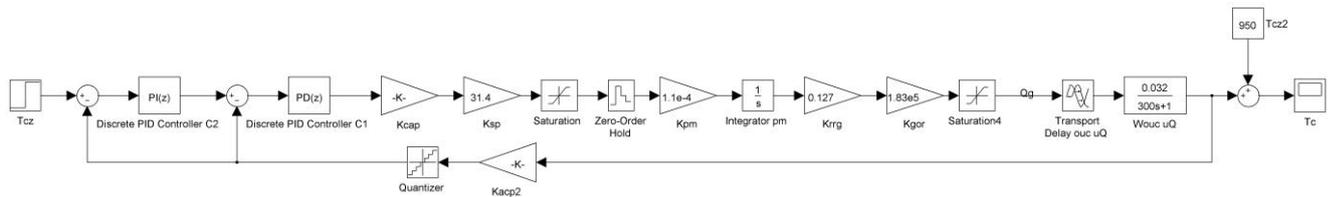


Рисунок 3.36 – Вычислительная модель цифровой САУ газовой горелкой

При этом параметры блока квантования по времени изменялись в интервале от 0,1с до 10с. При сравнении переходных процессов (рис. 3.37) непрерывной и цифровой систем управления газовой горелкой было установлено, что при шаге дискретизации  $T_k = 2\text{с}$  (частота замыканий ключа 0,5 Гц) в системе начинают возникать колебания температуры, а при частоте замыкания  $T_k = 10\text{с}$  система становится неустойчивой. При  $T_k = 1\text{с}$  (частота замыканий ключа 1 Гц) систему можно считать квазинепрерывной.

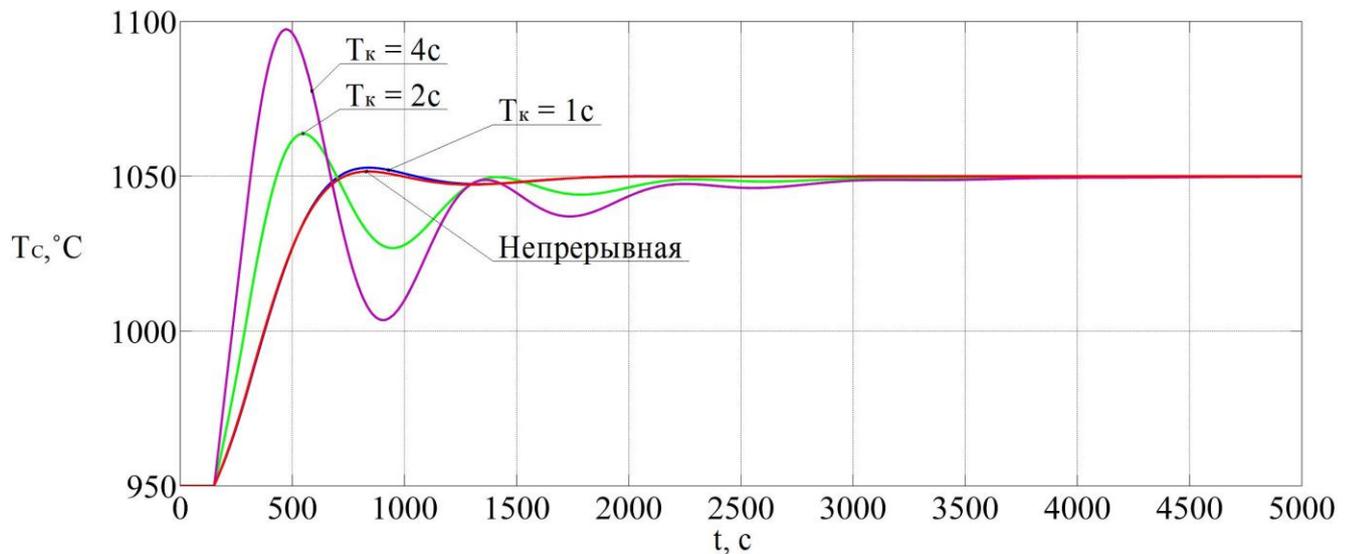


Рисунок 3.37 – Сравнение переходных процессов в непрерывной и цифровой САУ газовой горелкой

### Выводы по третьей главе

1. Сформулированы требования к многомерной системе автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита, заключающиеся в синтезе её структуры, обеспечивающей создание в печи желаемого температурного поля в условиях технологических ограничений, вызванных конструкцией печи, и при действии помех на процесс обжига, с отклонениями температуры в сечениях F, A и C от заданного значения в диапазоне  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

2. Сформулированы требования и задачи формирователя вектора задающих сигналов, заключающиеся в определении координат в построенных пространственных областях – параллелепипедах, в трёхмерном пространстве  $OT_F T_A T_C$ , включающих в себя множество сочетаний значений вектора  $T_i = [T_{Fi}, T_{Ai}, T_{Ci}]^T$ , задающих значения температуры при которых может быть осуществлено производство керамзита марки  $\Pi_i$  либо с максимальной прочностью либо с экономичным расходом энергоресурсов.

3. Разработан алгоритм цифрового задающего устройства, формирующего вектор задающих сигналов  $\bar{X}_y = [T_{F3}, T_{A3}, T_{C3}]^T$ , который позволяет накапливать массив данных о требуемых сочетаниях прочности  $R$  и насыпной плотности  $\rho$  и корректировать температуры  $T_{F3}$ ,  $T_{A3}$ ,  $T_{C3}$  через индивидуальный показатель конкретной глины  $\gamma_i$  для повышения соответствия получаемой прочности керамзита требуемой.

Разработан алгоритм работы МСАУ ТПОК в пространстве температурных параметров кривой обжига керамзита заданной прочности на основе взаимосвязанного управления электроприводами. Показано, что его практическое применение ориентировано на производство керамзита заданной  $R$  с погрешностью не более 5%.

4. Осуществлен структурный синтез МСАУ ТПОК за счёт автоматического согласованного управления скоростью вращения печи  $\omega_p$ , величиной загрузки сырца керамзита  $q_3$  в печь и объёмной тепловой мощностью горелки  $Q_r$  с целью получения и стабилизации требуемой прочности керамзита, содержащей три канала в виде многоконтурной системы с одной измеряемой координатой для обеспечения робастной устойчивости..

5. Показана эффективность применения программного задатчика для плавного изменения скорости электропривода вращающейся печи на этапах пуска и технологического перехода. В результате такого подхода пусковые токи и величины динамических ударов снизились в 1,5 – 3 раза, что продлевает срок эксплуатации оборудования.

6. Оценка каналов МСАУ ТПОК по робастности Цыпкина-Поляка и критерию устойчивости Найквиста показала, что они обладает свойством робастности в условиях параметрической неопределенности объекта управления.

## 4 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

### 4.1 Моделирование объекта управления МСАУ ТПОК

Для моделирования выбрана вращающаяся печь (рис. 1.5) (характеристики печи – пункт 1.2, глава 1), оборудованная газовой горелкой С 199-08-100 [1,6,21] (с расходом газа до 800 м<sup>3</sup>/час, тепловой мощностью до 9,3 МВт). В качестве обжигаемого сырья (пункт 1.1, глава 1) выбран слабовспучивающийся суглинок (бескудниковского месторождения), необходимый для получения керамзита с прочностью R 8 – 10 МПа.

В программной среде SolidWorks, на основе математического описания (2.3 – 2.5) и краевых условий (2.9, 2.14), в соответствии с разработанными расчётной схемой (рис. 2.3) и схемой ГУ (рис. 2.5) применительно к печи 2,5×40м, была создана вычислительная 3D модель (рис. 4.1) на основе методик [10,84,85, 115], теплофизические и геометрические параметры которой соответствуют действующей установке.

Методика численного моделирования включала в себя следующие этапы [34]:

1) Формирование условий создания вычислительной 3D модели печи в программной среде SolidWorks:

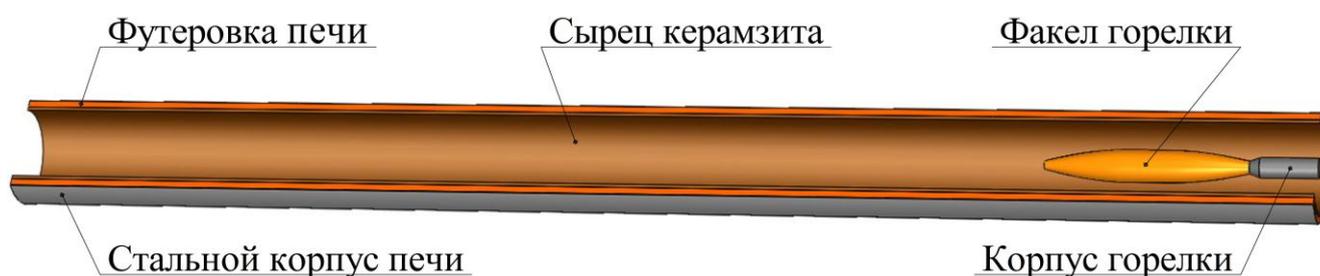


Рисунок 4.1 – Вычислительная 3D модель вращающейся печи (в разрезе)

в программной среде SolidWorks

а) теплообмен: теплопередача в твёрдых телах, радиационный (лучистый) теплообмен, объёмный тепловой источник (он моделирует факел печи) мощностью – 33600 Вт/м<sup>3</sup>, вращение печи – 0,08÷0,26 рад/с;

б) состав дымовых газов:

$\text{CO}_2$  – углекислый газ 6,55,

$\text{N}_2$  – азот 81,4,

$\text{O}_2$  –кислород 6,26,

$\text{H}_2\text{O}$  – водяной пар 5,79;

в) тип течения газа – турбулентный;

г) материал слоёв печи: корпус – сталь Ст.3 (из библиотеки материалов SolidWorks) с параметрами:  $\rho_{\text{ст}}$  – плотность  $7800 \text{ кг/м}^3$ ,  $C_{\text{ст}}$  – теплоёмкость  $462 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$ ,  $\lambda_{\text{ст}}$  – теплопроводность  $45,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ , температура плавления  $1410 \text{ °C}$ ; футеровка из огнеупорного кирпича (из библиотеки материалов SolidWorks) с параметрами:  $\rho_{\text{ф}}$  – плотность –  $2900 \text{ кг/м}^3$ ,  $C_{\text{ф}}$  – теплоёмкость  $1100 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$ ,  $\lambda_{\text{ф}}$  – теплопроводность  $1,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ , температура плавления  $1526,85 \text{ °C}$ , обжигаемый материал (создан на основе справочных данных) – сырец керамзита из слабовспучивающегося суглинка с параметрами:  $\rho_{\text{м}}$  – плотность  $1100 \text{ кг/м}^3$ ,  $C_{\text{м}}$  – теплоёмкость и  $\lambda_{\text{м}}$  – теплопроводность заданы графическими зависимостями [116-118] (рис. 4.2, 4.3);

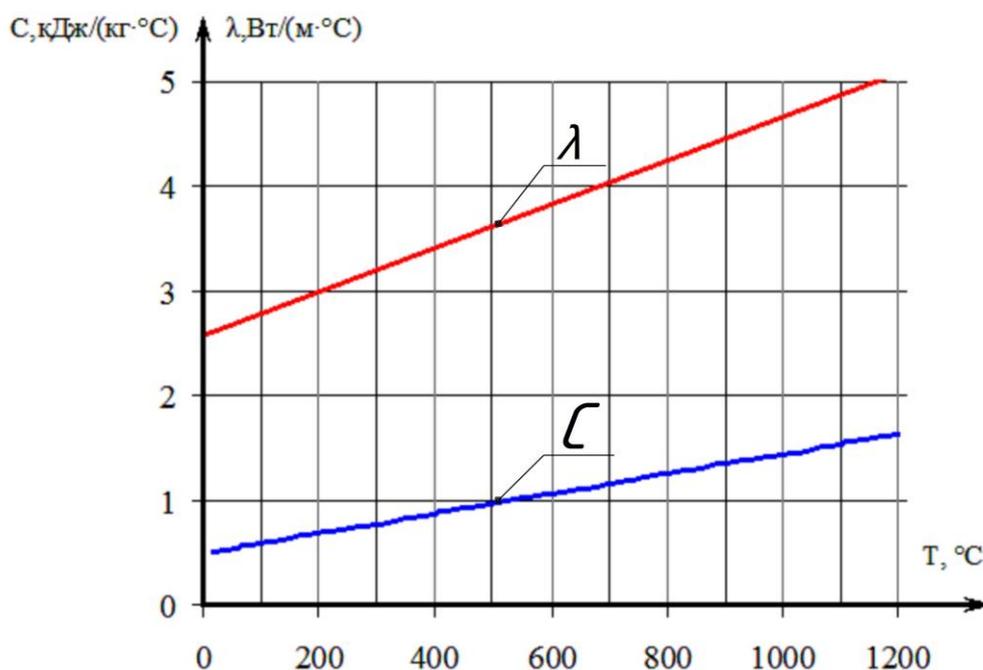


Рисунок 4.2 – Зависимость теплоёмкости и теплопроводности глины от температуры

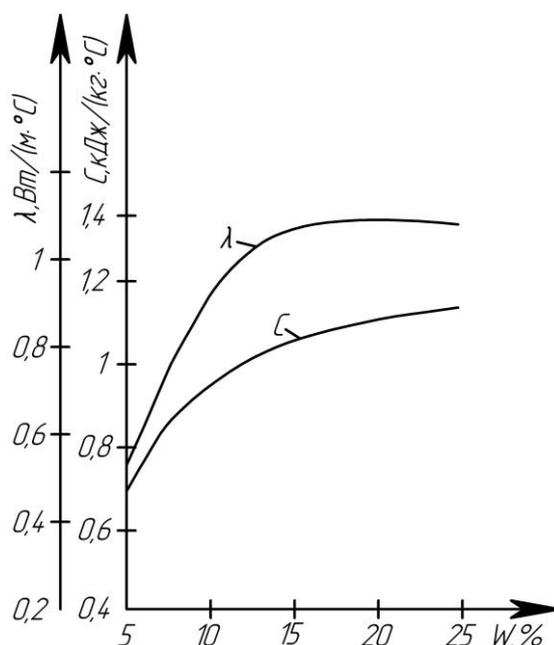


Рисунок 4.3 – Зависимость теплоёмкости и теплопроводности глины (бескудниковского месторождения) от влажности

- д) начальные условия газовой среды: температура – 30°C, скорость – 10 м/с;  
 е) начальные условия внешней поверхности стенки печи на основании экспериментальных данных [119] (рис. 4.4);  
 к) задание параметров расчётной сетки (уровень разрешения сетки 3).

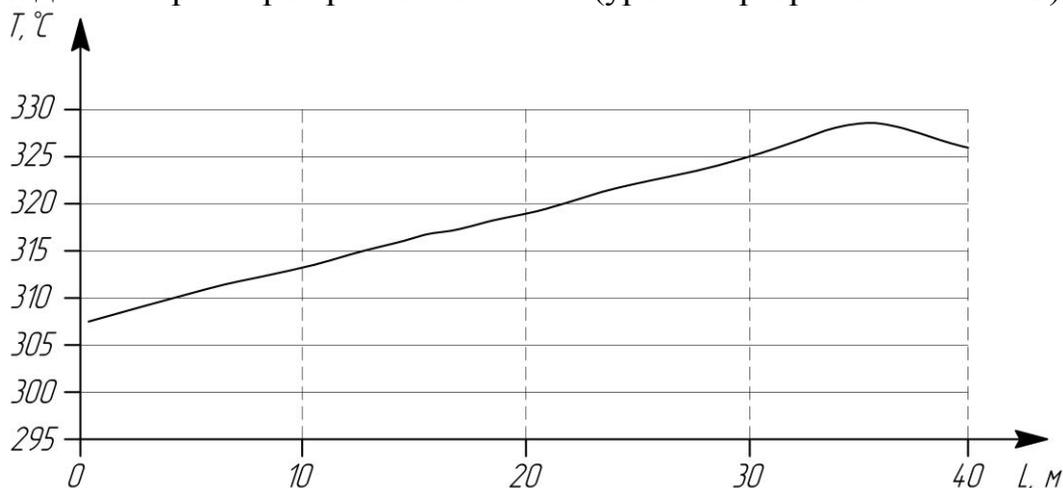


Рисунок 4.4 – Температура внешней поверхности стенки вращающейся печи

2) Исследование динамики прогрева печи 2,5×40м, в условиях ступенчатого изменения управляющих воздействий  $\omega_{п} = 0,26 \text{ с}^{-1}$ ,  $Q_{г} = 33600 \text{ Вт/м}^3$ , загрузки печи  $q_3 = 12,5 \text{ т/ч}$  сырцом керамзита влажностью  $w = 15\%$ , плотностью  $\rho_c = 1100 \text{ кг/м}^3$ , с коэффициентами теплопроводности  $\lambda = 2,6 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{С}$  и теплоёмкости  $C = 0,5 \text{ кДж/кг}^{\circ}\text{С}$  (рис. 4.2, 4.3).

Задавалось расчётное время более 24 часов. В результате расчётов получен массив данных, соответствующих кривым переходного процесса температуры для любой точки в объёме печи до установившегося состояния.

Установлено, что время прогрева печи, полученное на модели 86400с, отличается от времени прогрева технологической установки (Безымянский керамзитовый завод) не более чем на 5%.

3) Исследование влияния скорости  $\omega_n$  на формирование кривой обжига керамзита. Из технологически допустимого диапазона изменения скорости  $\omega_n$  выбрано три значения  $\omega_{n1} = 0,26$ ,  $\omega_{n2} = 0,13$ ,  $\omega_{n3} = 0,08 \text{ с}^{-1}$ , для которых выполнены по методике, описанной (в пункте 2), расчёты печи как ОРП. В результате получены кривые обжига 1–3 (рис. 2.22), представляющие собой сечение расчётной поверхности (рис. 2.21) вдоль оси  $z$ . Выполнено их сравнение с результатами натуральных исследований процесса обжига при вариации скорости вращения печи, полученных Онацким С.П. на печи  $2,5 \times 40 \text{ м}$ , кривые 4 – 6, которое показало, что погрешность, не превышает 5%. Отличие значений температуры в сечениях с координатами  $Z_F$ ,  $Z_C$  и  $Z_A$  составляет не более чем  $10^\circ\text{C}$ . Это является подтверждением адекватности созданной модели.

4) Исследования обжига керамзита в динамике. Допуская, что технологический режим обжига керамзита с заданной величиной  $R$  соответствует малым отклонениям управляющих воздействий относительно рабочей точки ( $\omega_{n0}$ ,  $q_{z0}$ ,  $Q_{r0}$ ), осуществлён структурный синтез многомерного объекта управления (2.29), в котором в качестве выходных координат принята температура в трёх характерных опорных сечениях печи:  $F$ ,  $A$  и  $C$  (рис. 2.22), а вектор управляющих воздействий включает в себя  $\omega_n$ ,  $q_z$ ,  $Q_r$ , основное возмущение  $w$  сырца.

Для нахождения собственных операторов и операторов перекрёстных связей этой структуры, описывающих динамику процесса обжига в малых отклонениях относительно некоторой кривой обжига, на разработанной модели ОРП проведено численное моделирование.

Для этого в модели ОРП, соответствующей технологическому режиму обжига керамзита, скачкообразно изменялись управляющие воздействия в виде малых отклонений  $\Delta\omega_n$ ,  $\Delta q_z$ ,  $\Delta Q_r$  и возмущения  $\Delta w$  от установившегося режима. При этом наблюдались динамические процессы изменения температуры керамзита в характерных сечениях  $F$ ,  $A$  и  $C$  печи. Исследования функций отклика обжига в сечениях печи  $F$ ,  $A$  и  $C$  на ступенчатые изменения «в малом» одного из управляющих или возмущающих воздействий проводились при условии, когда другие воздействия постоянны. Величины ступенчатых воздействий  $\Delta\omega_n = \pm 5\%$ ;  $\pm 10\%$ ;  $\pm 15\%$  от значений  $\omega_{n0} = 0,26$ ;  $0,13$ ;  $0,08 \text{ с}^{-1}$  (рис. 2.23),  $\Delta q_z = + 3,5$ ;  $+ 7,5 \text{ т/ч}$  от  $q_z = 4,5 \text{ т/ч}$  (рис. 2.24),  $\Delta Q_r = \pm 1888$ ;  $\pm 3776$ ;  $\pm 5664 \text{ Вт/м}^3$  от  $Q_r = 33600 \text{ Вт/м}^3$  (рис. 2.25),  $\Delta w = \pm 10\%$ ;  $\pm 30\%$  от  $w = 15\%$  (рис. 2.26).

По результатам численного моделирования можно сделать вывод, что влияние перекрёстных связей составляет от 5 до 30% по сравнению с основными управляющими воздействиями в этих каналах. При этом наблюдается соответствующее определённому управляющему воздействию запаздывание.

Далее осуществлялась идентификация собственных операторов и операторов перекрёстных связей многомерного объекта по переходным характеристикам по отношению к управляющим и возмущающим воздействиям (рис. 2.23 – 2.26) (подробно рассмотрено в главе 2).

Установлено, что оператор  $W_{11}$  сепаратного канала и операторы  $M_{21}$ ,  $M_{31}$  каналов перекрёстных связей объекта «в малом» могут быть описаны апериодическими звеньями. А операторы  $W_{22}$ ,  $W_{33}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{32}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{23}$ ,  $H_{14}$ ,  $H_{24}$ ,  $H_{34}$  – апериодическими звеньями с запаздыванием. Показано, что параметры этих звеньев существенно зависят от значений координат рабочей точки режима печи (скорость  $\omega_{п0}$ , загрузка сырца  $q_{30}$ , объёмная тепловая мощность  $Q_{г0}$  горелки).

Сравнение переходных характеристик (рис. 2.23 – 2.26), полученных на модели, с переходными характеристиками типовых звеньев сепаратных каналов, выполненные в программной среде MATLAB показывает, что эти характеристики отличаются не более, чем на 5%.

#### 4.2 Моделирование одномассового и трёхмассового исполнительных электроприводов вращающейся печи

1) На основании структурной схемы (рис. 2.7) построена вычислительная модель одномассового вспомогательного асинхронного привода 2,2 кВт, 750 об/мин (рис. 4.5) в программной среде MATLAB. Здесь блоки  $M1$  и  $M2$  представляют собой апериодические звенья с постоянной времени  $T_1$ ;  $M10$  и  $M11$  – апериодические звенья с постоянной времени  $T_2$ ;  $M3$  и  $M14$  – постоянные времени  $T_1$  и  $T_2$ , соответственно, в качестве коэффициентов. Блок  $M4$  моделирует коэффициент  $\gamma^*$ ;  $M5$  и  $M6$  – отношение индуктивностей  $L_0/L_1$ ;  $M7$  –  $M9$  – постоянную времени  $T_{32}$ ;  $M12$  – произведение  $\frac{3}{2} \cdot p_n \cdot L_0$ ;  $M13$  – интегратор с моментом инерции  $J_{пр}$  в качестве постоянной времени;  $M15$  – число пар полюсов двигателя  $p_n$ . Момент инерции двигателя  $J = 0,019 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , момент нагрузки  $M_n = 5 \text{ Нм}$ .

Проведено численное моделирование, для этого на вход электропривода подавалась без нагрузки и под нагрузкой частота питающего напряжения  $\omega = 314 \text{ рад/с}$ . В результате по полученным графикам (рис. 4.6 – 4.8) сделан вывод об уменьшении величины, перерегулирования и времени переходного процесса под действием нагрузки.

2) В соответствии с рисунком 2.10 построена вычислительная модель трёхмассового вспомогательного асинхронного привода 2,2 кВт, 750 об/мин (рис. 4.9). В модели трёхмассового привода приняты следующие значения: коэффициенты крутильной жесткости муфт  $C_{м1} = 0,64 \cdot 10^6 \text{ Нм/рад}$ ,  $C_{м2} = 3,13 \cdot 10^6 \text{ Нм/рад}$ ; коэффициенты демпфирования  $D_{м1} = 214,013$ ,  $D_{м2} = 3426,49$ ; постоянные времени  $T_{11} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ ,  $T_{12} = 10,95 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ ; моменты инерции двигателя  $J_1 = 0,017 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , редуктора  $J_2 = 39,77 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  и вращающейся печи  $J_3 = 258305,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ; момент нагрузки  $M_n = 35 \text{ кНм}$ ; передаточные числа  $i_1 = 1260$ ,  $i_2 = 7,1$ .

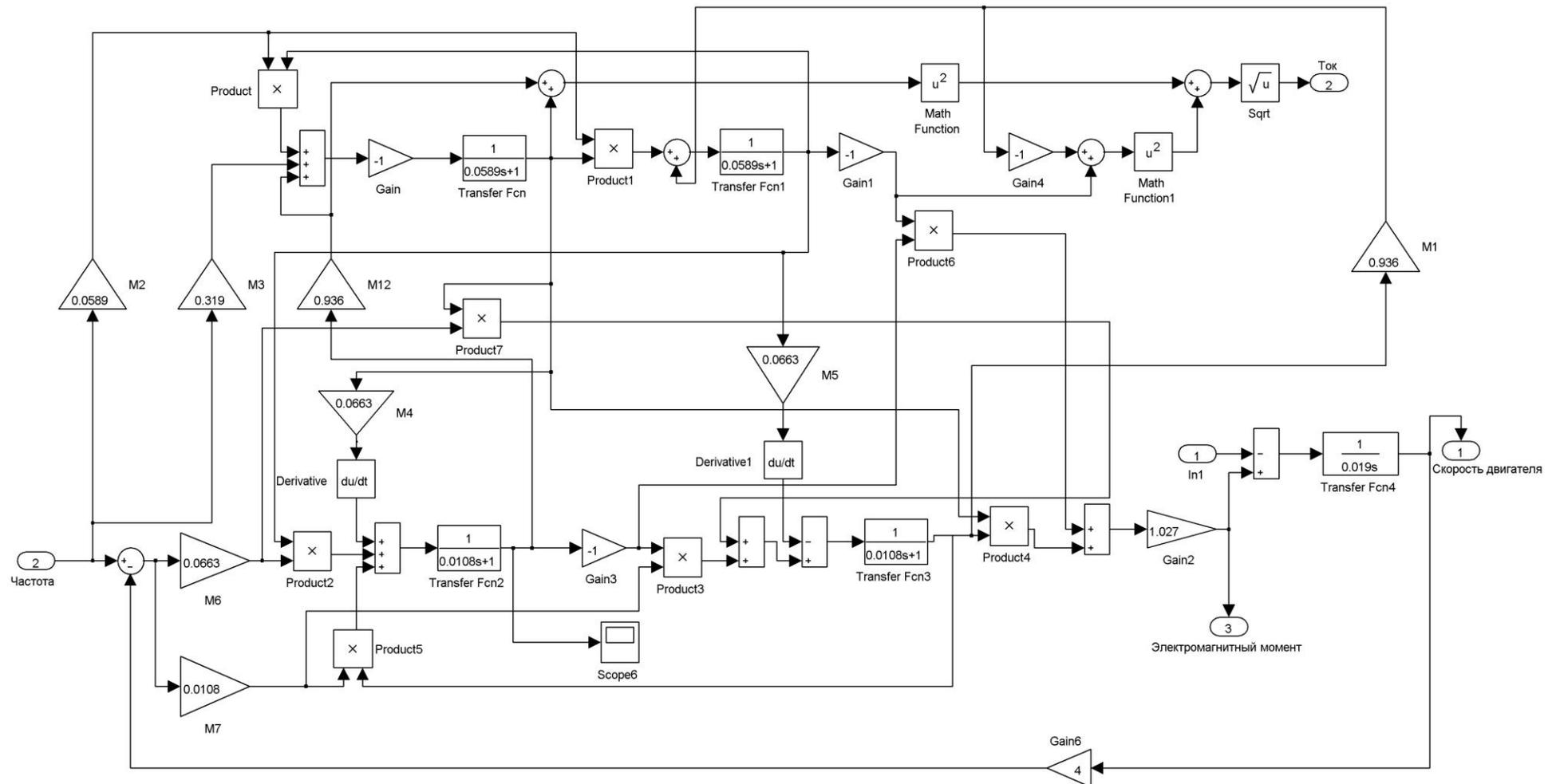
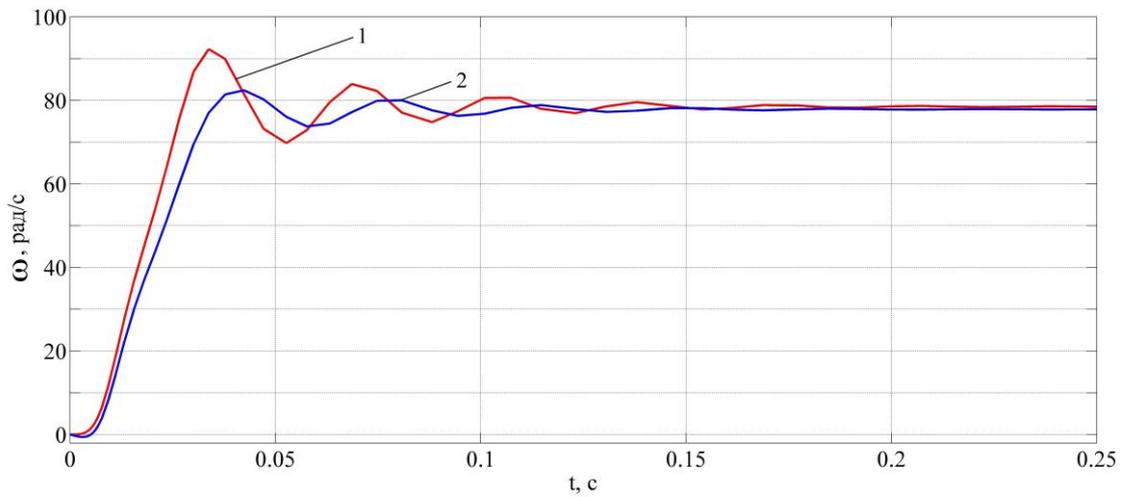
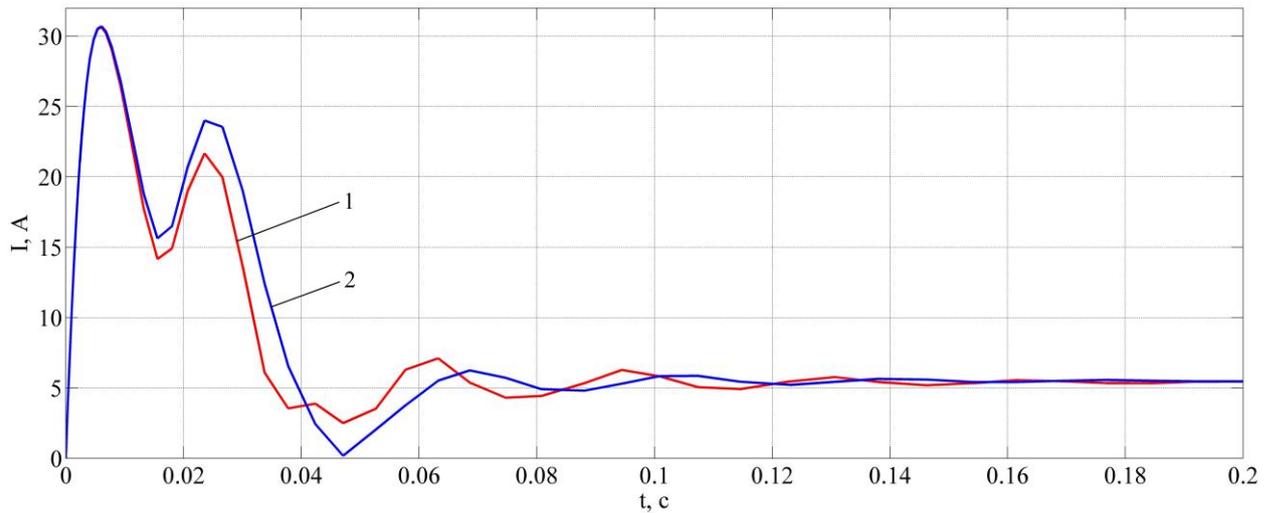


Рисунок 4.5 – Вычислительная модель вспомогательного одномассового асинхронного привода



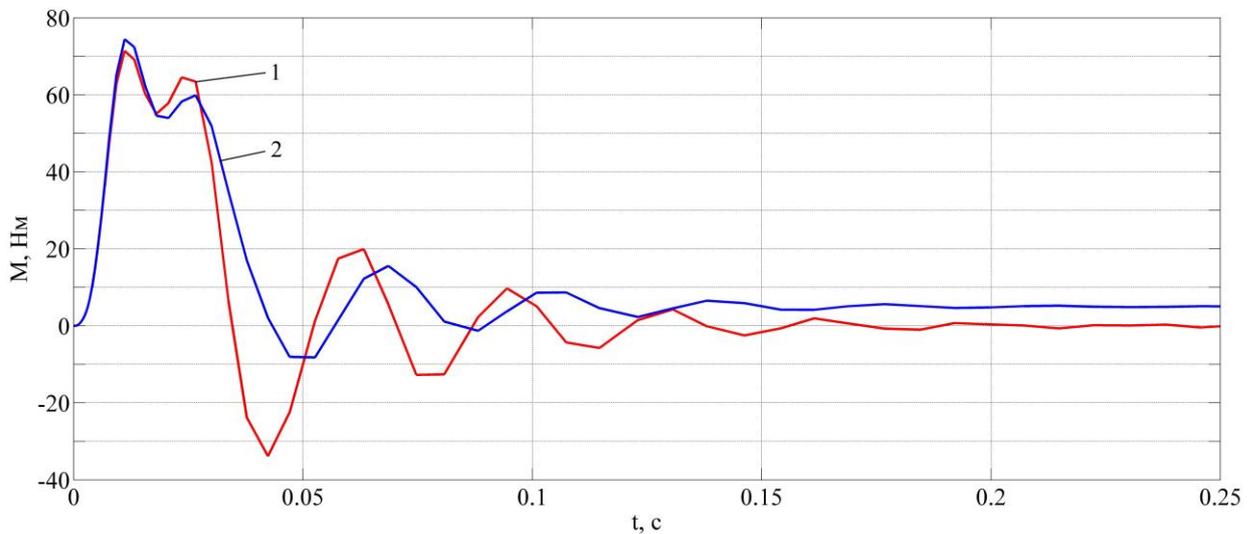
1 – без нагрузки, 2 – под нагрузкой

Рисунок 4.6 – Скорость асинхронного электропривода



1 – без нагрузки, 2 – под нагрузкой

Рисунок 4.7 – Ток асинхронного электропривода



1 – без нагрузки, 2 – под нагрузкой

Рисунок 4.8 – Электромагнитный момент асинхронного электропривода

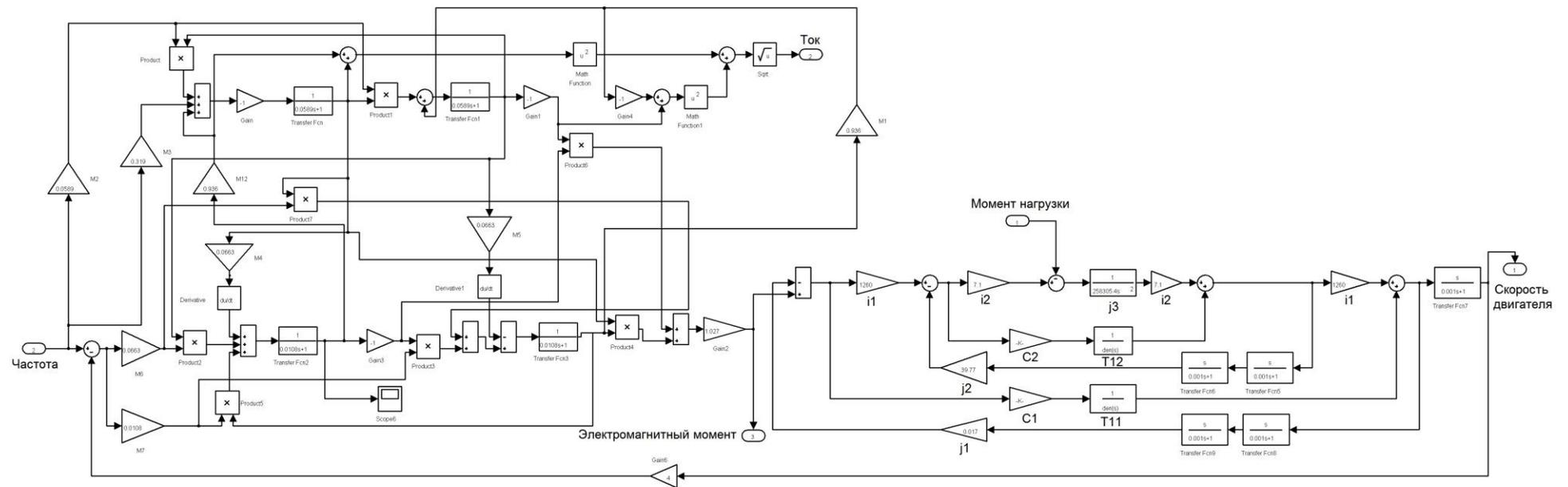
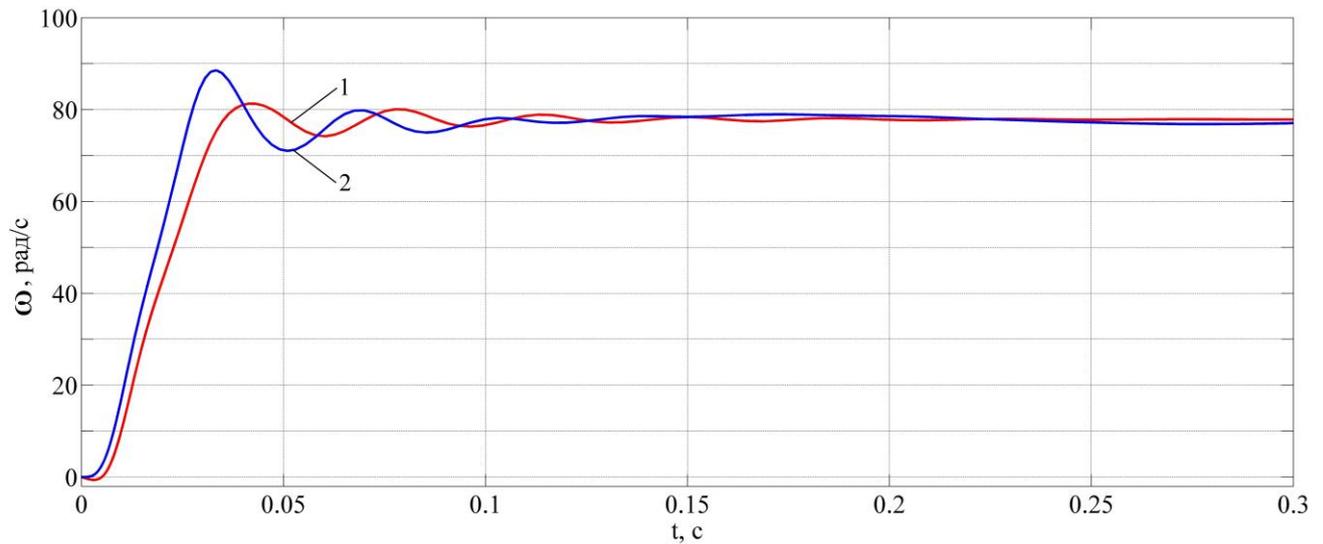


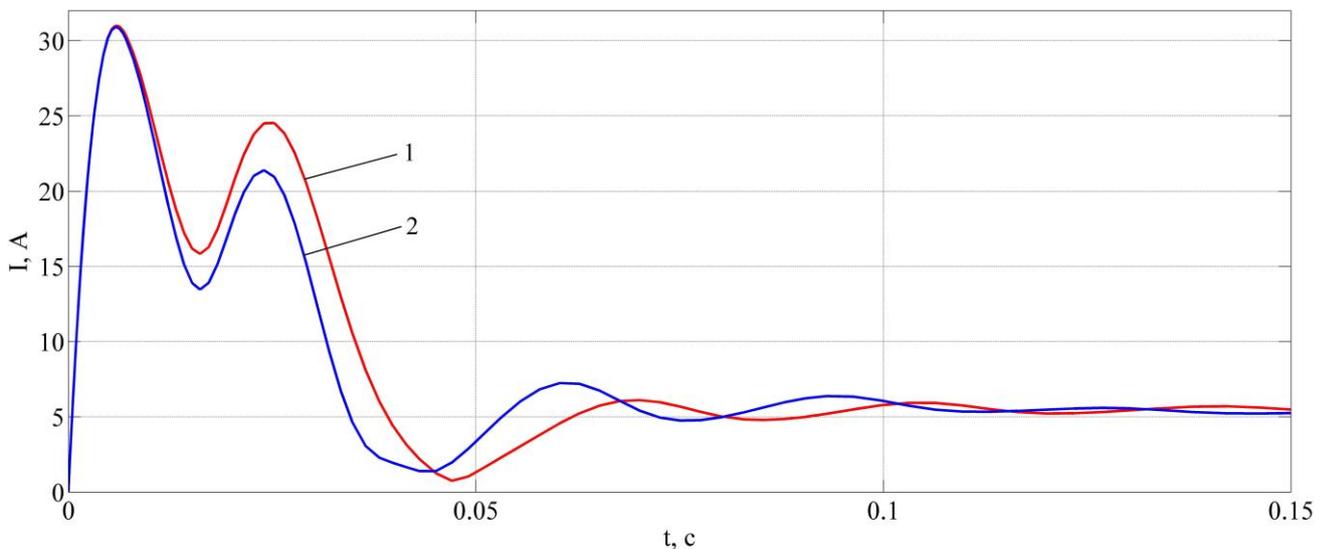
Рисунок 4.9 – Вычислительная модель вспомогательного трёхмассового асинхронного привода

При проведении численного моделирования на вход одномассового и трёхмассового электроприводов подавалась частота питающего напряжения  $\omega = 314$  рад/с. Результаты исследований приведены (рис. 4.10 – 4.12), анализируя которые сделан вывод, что действие упругих связей проявляется в увеличении времени переходного процесса и перерегулирования. Данный факт особенно заметен (рис. 4.12, график 2) при наблюдении переходного процесса момента асинхронного электропривода. Следует отметить, что продолжительные колебания (рис. 4.12, график 2) носят затухающий характер.



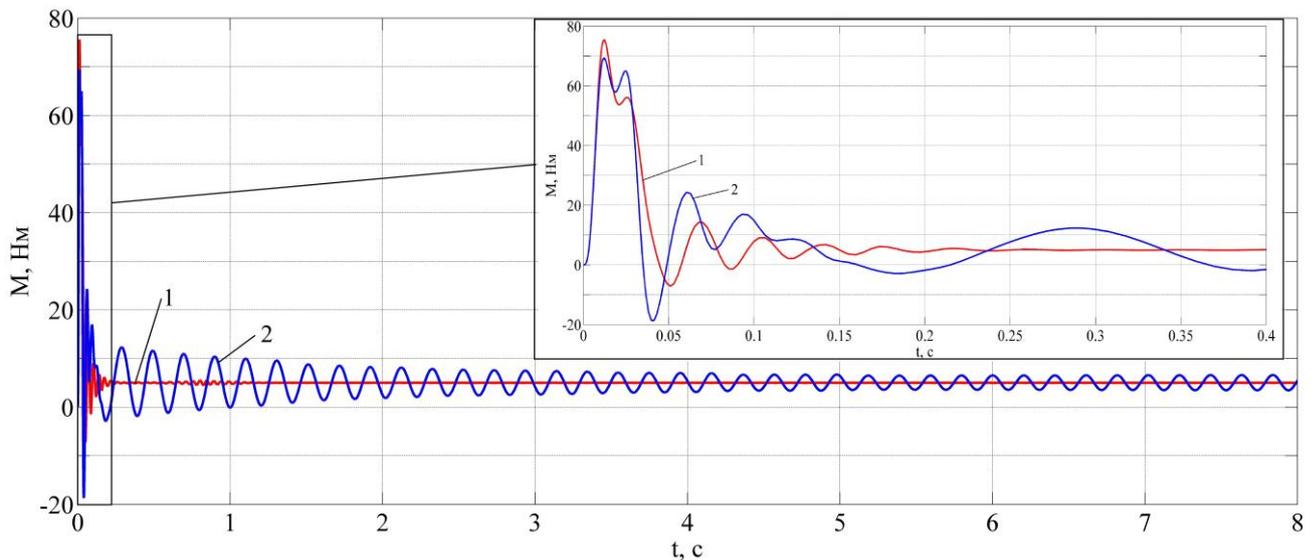
1 – одномассового, 2 – трёхмассового

Рисунок 4.10 – Скорость асинхронного электропривода



1 – одномассового, 2 – трёхмассового

Рисунок 4.11 – Ток асинхронного электропривода



1 – одномассового, 2 – трёхмассового

Рисунок 4.12 – Электромагнитный момент асинхронного электропривода

Проведено аналогичное численное моделирование на главном приводе:

1) В соответствии с рисунками 2.7 и 2.10 созданы вычислительные модели одномассового и трёхмассового главного асинхронного привода 30 кВт, 750 об/мин (рис. 4.13, 4.14) в программной среде MATLAB. В модели одномассового привода момент инерции двигателя  $J = 3,94 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , момент нагрузки  $M_H = 123 \text{ Нм}$ . В модели трёхмассового привода коэффициенты крутильной жесткости муфт  $C_{m1} = 1,86 \cdot 10^6 \text{ Нм/рад}$ ,  $C_{m2} = 3,13 \cdot 10^6 \text{ Нм/рад}$ ; коэффициенты демпфирования  $D_{m1} = 464,67$ ,  $D_{m2} = 3426,49$ ; постоянные времени  $T_{11} = 2,48 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ ,  $T_{12} = 10,95 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ , моменты инерции двигателя  $J_1 = 0,738 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , редуктора  $J_2 = 39,57 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  и вращающейся печи  $J_3 = 258305,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ; момент нагрузки  $M_H = 35 \text{ кНм}$ , передаточные числа  $i_1 = 40$ ,  $i_2 = 7,1$ . На вход электроприводов подавалась частота питающего напряжения  $\omega = 314 \text{ рад/с}$  без нагрузки (рис. 4.15 – 4.17) и с нагрузкой (рис. 4.18 – 4.20).

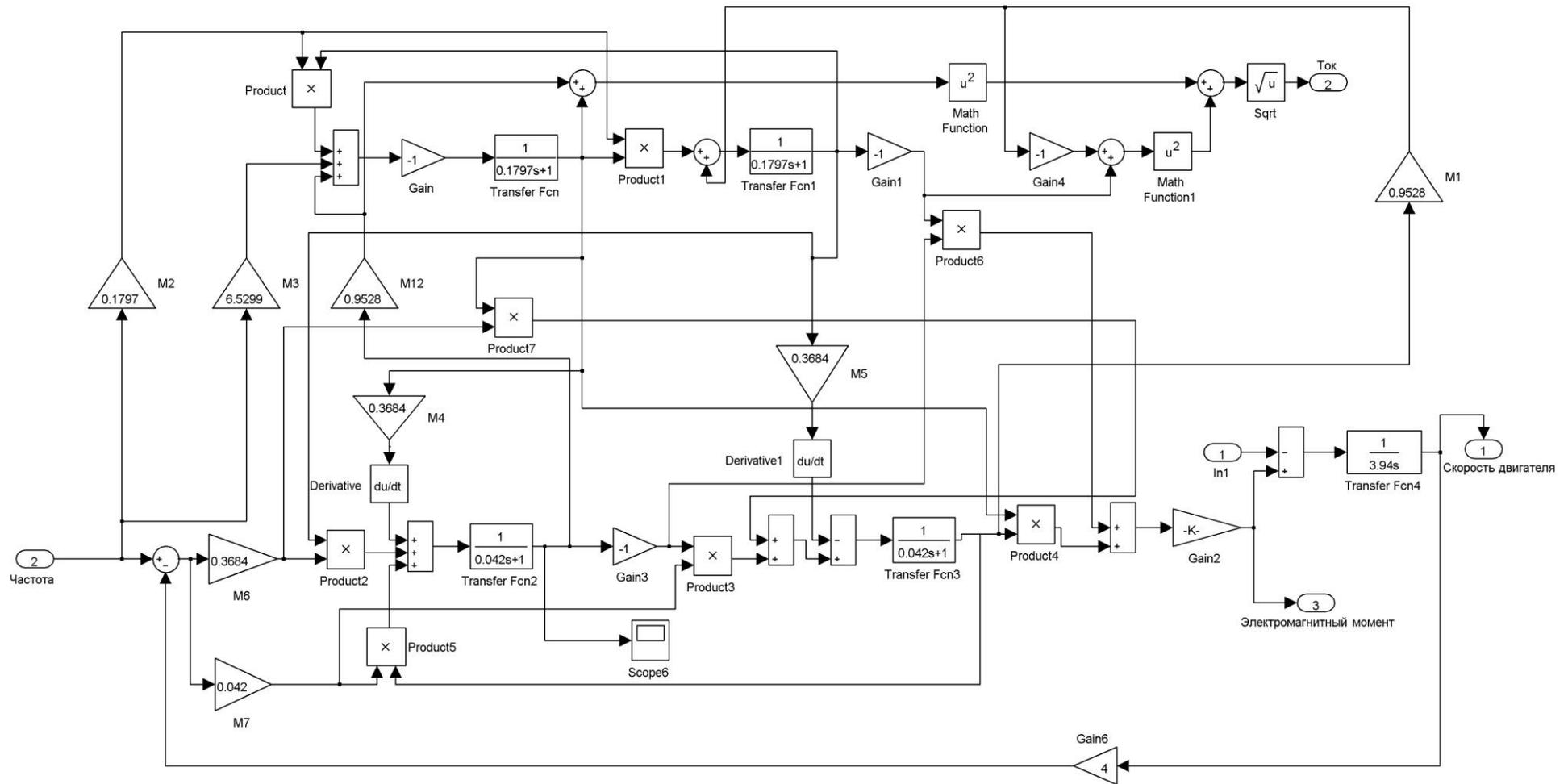


Рисунок 4.13 – Вычислительная модель главного одномассового асинхронного привода

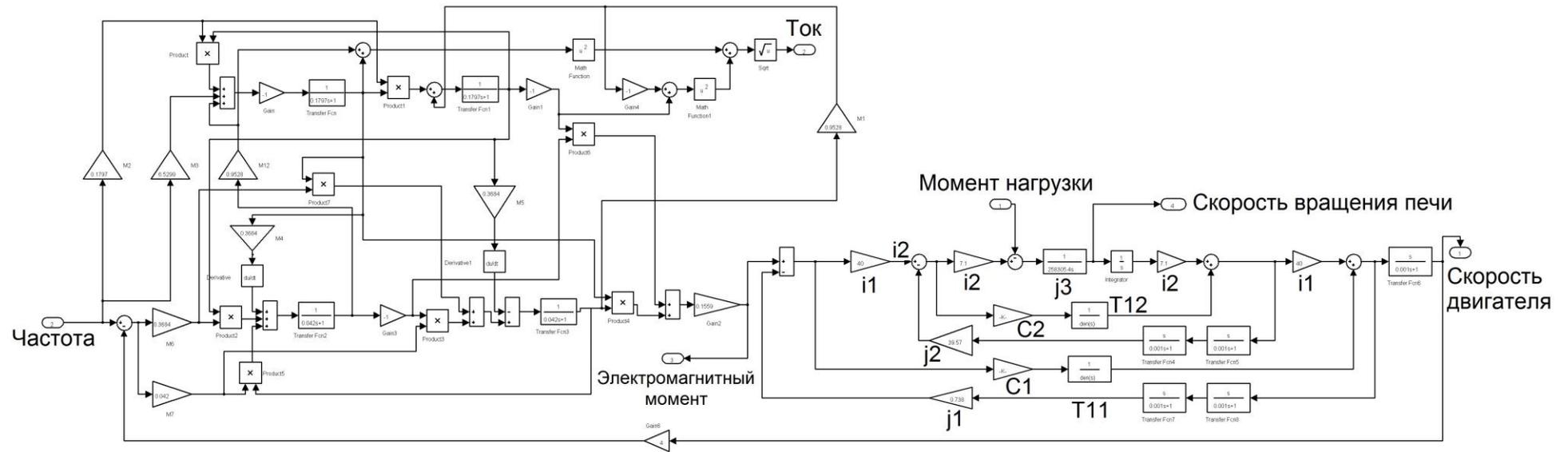
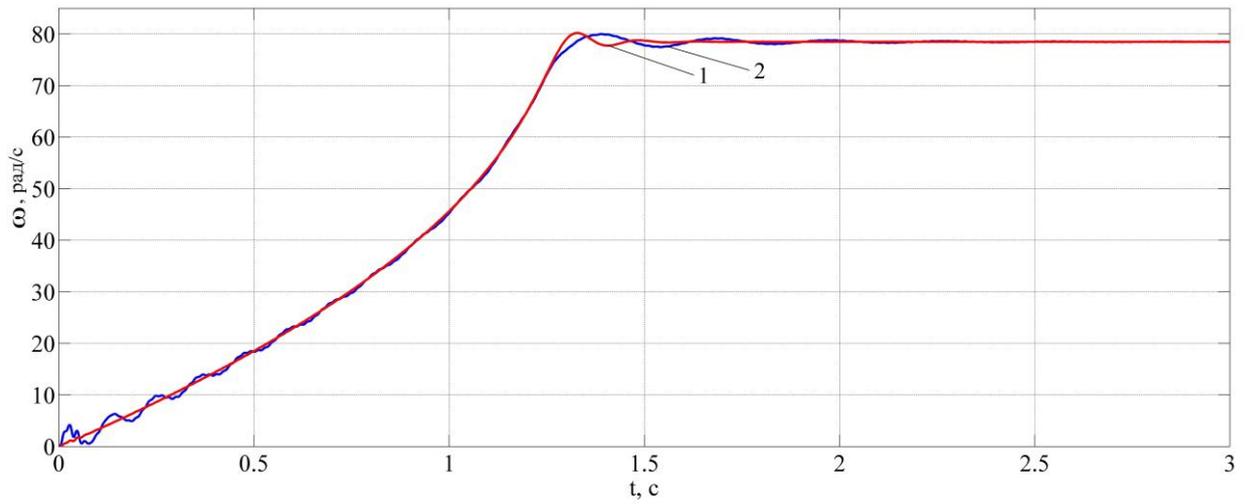
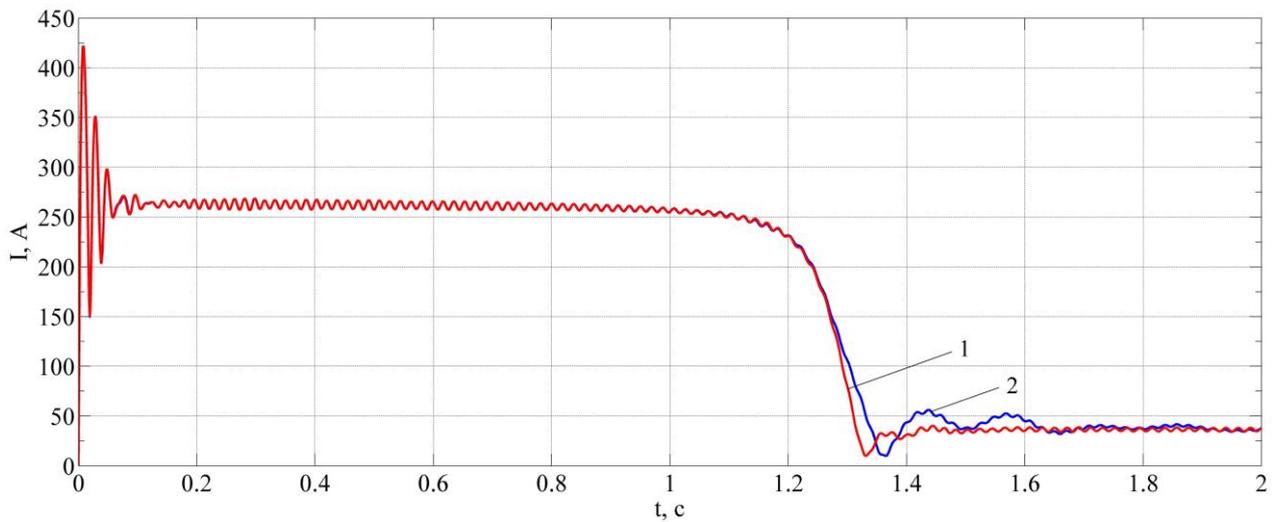


Рисунок 4.14 – Вычислительная модель главного трёхмассового асинхронного привода



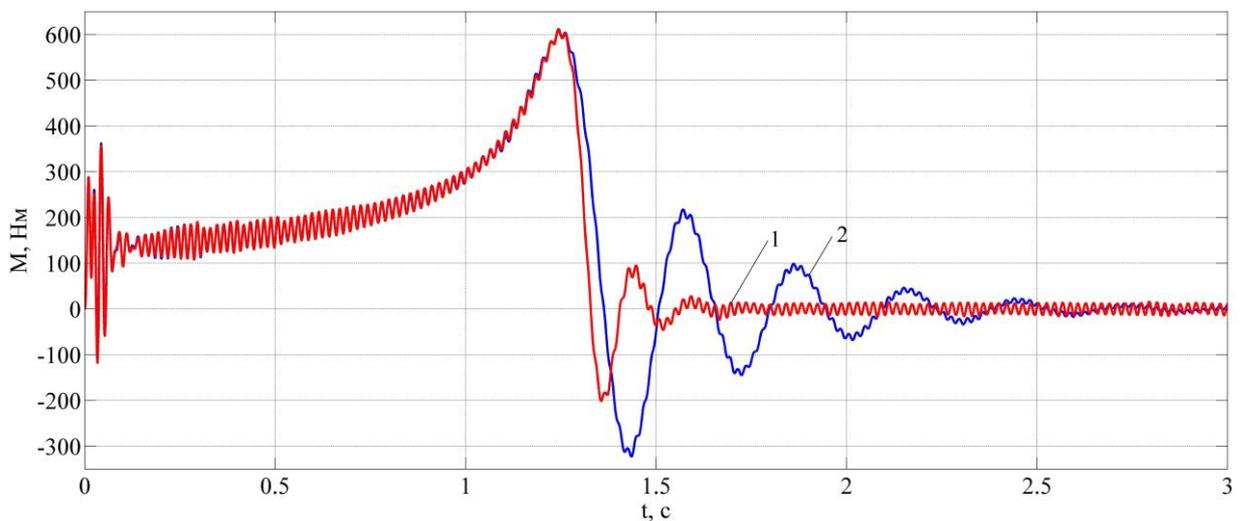
1 – одномассового, 2 – трёхмассового

Рисунок 4.15 – Скорость асинхронного электропривода без нагрузки



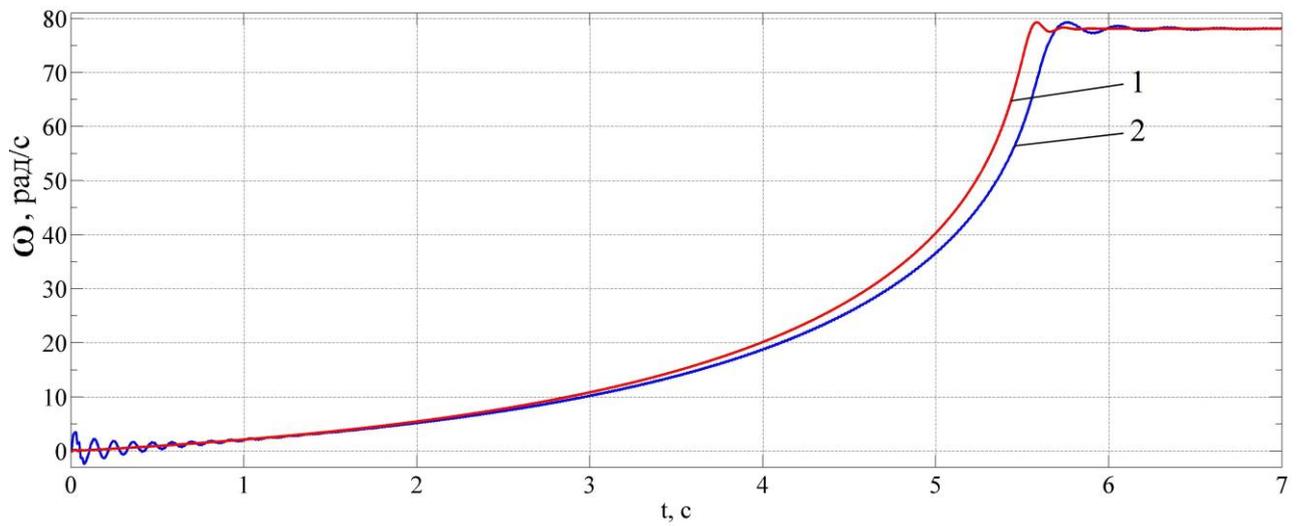
1 – одномассового, 2 – трёхмассового

Рисунок 4.16 – Ток асинхронного электропривода без нагрузки



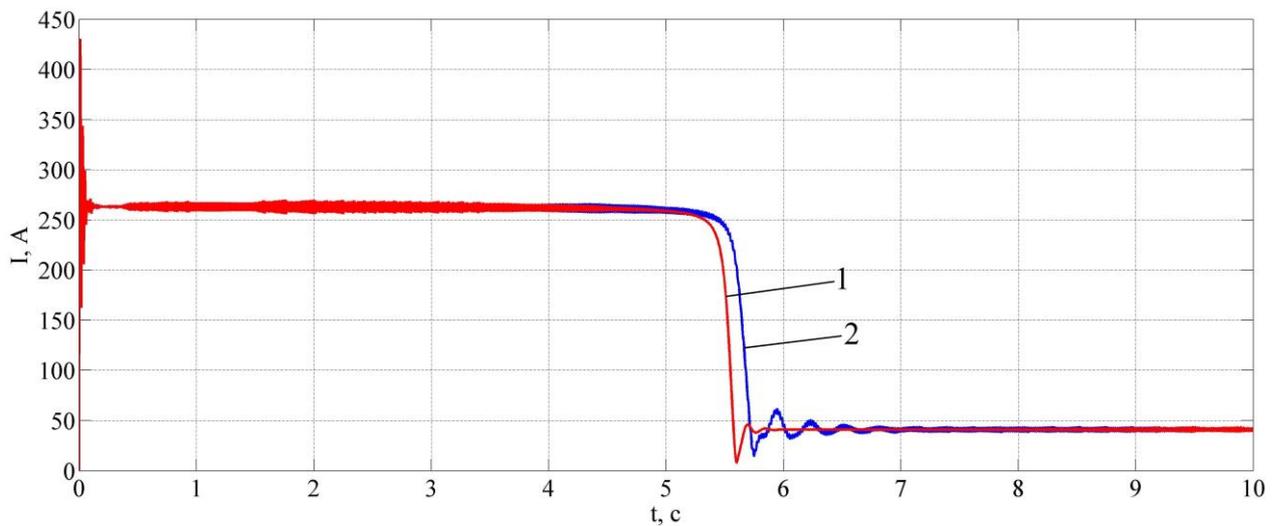
1 – одномассового, 2 – трёхмассового

Рисунок 4.17 – Электромагнитный момент асинхронного электропривода без нагрузки



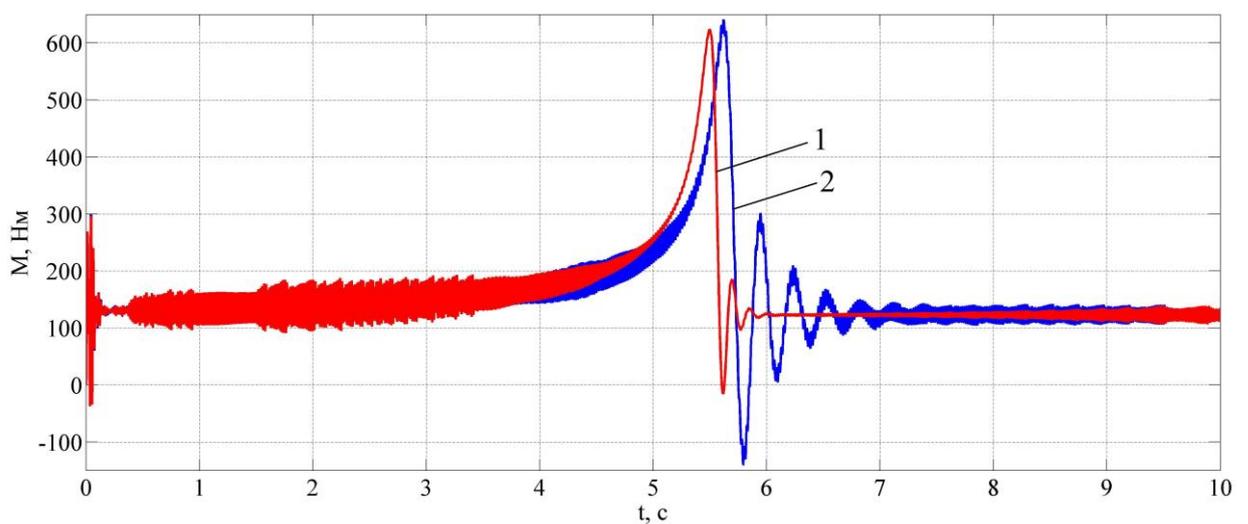
1 – одномассового, 2 – трёхмассового

Рисунок 4.18 – Скорость асинхронного электропривода с нагрузкой



1 – одномассового, 2 – трёхмассового

Рисунок 4.19 – Ток асинхронного электропривода с нагрузкой



1 – одномассового, 2 – трёхмассового

Рисунок 4.20 – Электромагнитный момент асинхронного электропривода с нагрузкой

В результате анализа графиков (рис. 4.15 – 4.20) сделан вывод, что без нагрузки и под нагрузкой графики переходных процессов по скорости, току и моменту трёхмассового асинхронного привода отличаются от одномассового большей колебательностью, обусловленной наличием упругих связей.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что для уменьшения пусковых токов и разрушающих усилий, увеличения долговечности футеровки печи и надежности электропривода пуск должен производиться плавно с минимально возможным ускорением. Для этого предлагается применить программный задатчик (глава 3, пункт 3.4).

### **4.3 Определение характера переходных процессов и построение вычислительной модели объекта управления**

Определение характеристик обжига проводилось путём наблюдения изменения температуры в выбранных опорных сечениях (рис. 1.3): в конце зоны сушки (точка F), в конце зоны нагрева (точка A) и в середине зоны вспучивания (точка C).

Вначале задавалась номинальная скорость вращения печи  $\omega_{п} = 0,26 \text{ с}^{-1}$ , начальная объёмная тепловая мощность, передаваемая горелкой печи  $Q_{г} = 33600 \text{ Вт/м}^3$  и загрузка сырца керамзита  $q_3 = 4,5 \text{ т/ч}$ . В момент времени 20000с подавалось ступенчатое управляющее воздействие  $\Delta\omega_{п}$ . Было проведено 6 экспериментов: 3 – ниже начального уровня  $\omega_{п} = 0,26 \text{ с}^{-1}$  и 3 – выше этого уровня. Значения  $\Delta\omega_{п}$  для этих опытов:  $\Delta\omega_{п1} = \pm 5\%$ ,  $\Delta\omega_{п2} = \pm 10\%$ ,  $\Delta\omega_{п3} = \pm 15\%$ . Аналогично эксперименты были проведены для скоростей вращения печи  $\omega_{п} = 0,13 \text{ с}^{-1}$ ;  $0,08 \text{ с}^{-1}$ .

На рисунке 2.23 представлены графики переходных процессов по отношению к управляющему воздействию  $\omega_{п} = 0,08 \text{ с}^{-1}$ . Здесь 1 – переходные процессы, протекающие в точке F. Переходные характеристики по управлению скоростью вращения печи представляют собой монотонные процессы, отличающиеся лишь быстродействием и коэффициентами передачи (табл. 2.4), и могут быть описаны апериодическим звеном (табл. 2.3), поэтому графики для других скоростей (в том числе в точках A и C) не показаны.

Далее была задана начальная загрузка сырца керамзита  $q_3 = 4,5 \text{ т/ч}$ , скорость вращения печи  $\omega_{п} = 0,26 \text{ с}^{-1}$  и объёмная тепловая мощность, передаваемая горелкой печи  $Q_{г} = 33600 \text{ Вт/м}^3$ . В момент времени 20000с подавалось

ступенчатое управляющее воздействие  $\Delta q_3$ . Было проведено 2 эксперимента. Значения  $\Delta q_3$  для этих опытов:  $\Delta q_{31} = + 3,5$  т/ч,  $\Delta q_{32} = + 7,5$  т/ч.

На рисунке 2.24 представлены графики переходных процессов по отношению к управляющему воздействию  $q_3$  (при  $\omega_n = 0,08$  с<sup>-1</sup>). Здесь 1 – переходные процессы, протекающие в точке F. Переходные характеристики по управлению загрузкой сырца керамзита представляют собой монотонные процессы, но уже с явно выраженным запаздыванием, которые отличаются только быстродействием и коэффициентами передачи (табл. 2.6) и могут быть описаны последовательным соединением апериодического звена и звена запаздывания (табл. 2.3), поэтому графики для других скоростей (в том числе в точках А и С) не показаны.

Далее была задана начальная объёмная тепловая мощность, передаваемая горелкой печи  $Q_r = 33600$  Вт/м<sup>3</sup>, скорость вращения печи  $\omega_n = 0,26$  с<sup>-1</sup> и загрузка сырца керамзита  $q_3 = 4,5$  т/ч. В момент времени 20000с было подано ступенчатое управляющее воздействие  $\Delta Q_r$ . В результате проведено 6 экспериментов: 3 – ниже начального уровня  $Q_r = 33600$  Вт/м<sup>3</sup> и 3 – выше этого уровня. Значения  $\Delta Q_r$  для этих опытов:  $\Delta Q_{r1} = -5664$  Вт/м<sup>3</sup>,  $\Delta Q_{r2} = -3776$  Вт/м<sup>3</sup>,  $\Delta Q_{r3} = -1888$  Вт/м<sup>3</sup>,  $\Delta Q_{r4} = 1888$  Вт/м<sup>3</sup>,  $\Delta Q_{r5} = 3776$  Вт/м<sup>3</sup>,  $\Delta Q_{r6} = 5664$  Вт/м<sup>3</sup>, соответственно.

На рисунке 2.25 представлены графики переходных процессов по отношению к управляющему воздействию  $Q_r$  (при  $\omega_n = 0,08$  с<sup>-1</sup>). Здесь 1 – переходные процессы, протекающие в точке F. Переходные характеристики по управлению мощностью горелки представляют собой монотонные процессы с явно выраженным запаздыванием, которые отличаются только быстродействием и коэффициентами передачи (табл. 2.5). Поэтому их можно представить последовательным соединением апериодического звена и звена запаздывания (табл. 2.3). Графики для других скоростей (в том числе в точках А и С) не показаны.

На следующем этапе задавалось начальная влажность сырца керамзита  $w = 15\%$ . В момент времени 20000с было подано ступенчатое возмущающее воздействие  $\Delta w$ , в результате проведено 4 эксперимента. Значения  $\Delta w$  для этих опытов:  $\Delta w_1 = +10\%$  ( $w = 17\%$ ),  $\Delta w_2 = \pm 30\%$  ( $w = 20\%$ ),  $\Delta w_3 = -10\%$  ( $w = 13\%$ ),  $\Delta w_4 = -30\%$  ( $w = 10\%$ ).

На рисунке 2.26 представлены графики переходных процессов по отношению к возмущающему воздействию  $w$  (при  $\omega_n = 0,08$  с<sup>-1</sup>). Здесь 1 – переходные процессы, протекающие в точке F. Переходные характеристики по возмущению – влажности сырца керамзита представляют собой монотонные

процессы с явно выраженным запаздыванием, которые отличаются только быстродействием и коэффициентами передачи (табл. 2.7) и могут быть описаны последовательным соединением аperiodического звена и звена запаздывания (табл. 2.3), поэтому графики для других скоростей (в том числе в точках А и С) не показаны.

Для оценки взаимовлияния каналов объекта управления на него подавались управляющие воздействия  $\Delta\omega_{\text{п}} = 0,012$  рад/с,  $\Delta q_3 = 3,5$  т/ч,  $\Delta Q_{\text{г}} = 5664$  Вт/м<sup>3</sup> результаты представлены на рисунке 2.27 для сечений F, А и С соответственно.

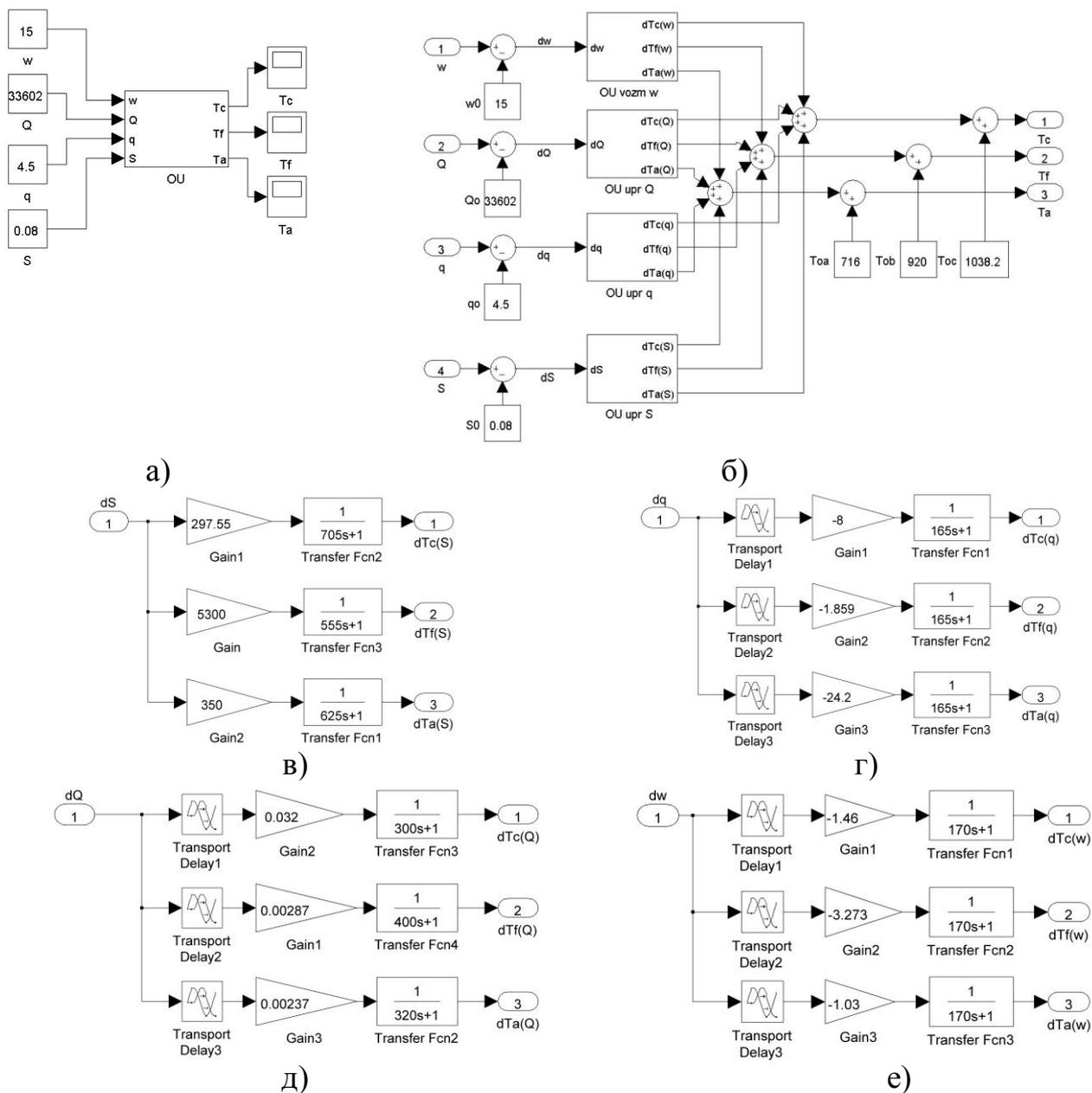


Рисунок 4.21 – Вычислительная модель объекта управления

Для оценки адекватности переходных характеристик температуры керамзита в динамике и дальнейшего построения системы автоматического управления была произведена аппроксимация характеристик полученных из SolidWorks на модели с распределенными параметрами, передаточными функциями с сосредоточенными параметрами в программной среде MATLAB (рис. 2.23 – 2.26), величина среднеквадратичного отклонения не превысила 5 %.

Вычислительная модель объекта управления была создана в программной среде MATLAB (рис. 4.21) на основе структурной схемы объекта управления (рис. 2.29) и передаточных функций (табл. 2.3), полученных путём аппроксимации характеристик из математической модели, созданной в SolidWorks с использованием методик, приведенных в работах [120,121]. В модель объекта входят четыре основных блока: по управлению скоростью вращения печи  $\omega_n$ , по управлению загрузкой сырца керамзита в печь  $q_3$ , по управлению объёмной тепловой мощностью горелки  $Q_r$ , по возмущению  $w$  – влажность сырца.

#### **4.4 Вычислительная модель МСАУ ТПОК. Параметрическая настройка регуляторов**

На основе структурной схемы МСАУ ТПОК (рис. 3.6), синтез и требования к которой (с учётом особенностей технологического процесса производства керамзита) рассмотрены в главе 3, а также методик [122-130] построена вычислительная модель МСАУ ТПОК (рис. 4.22).

Рассмотрим настройку регуляторов МСАУ ТПОК. В канале стабилизации температуры в сечении F использована методика настройки МСОИК, описанная в работах Галицкого С.Я. [93], а именно в первом и во втором контурах системы

выбраны ПИ регуляторы с передаточными функциями  $W_{R1}(p) = K_{1П} \cdot \frac{T_{1И}p + 1}{p}$  и

$W_{R2}(p) = K_{2П} \cdot \frac{T_{2И}p + 1}{p}$  для обеспечения астатичности, монотонного характера

кривой переходного процесса и повышения быстродействия. Подбор значений показал, что оптимальными величинами являются  $K_{1П} = 0,0002$ ,  $T_{1И} = 500$ ;  $K_{2П} = 0,004$ ,  $T_{2И} = 350$  (табл. 4.1) (рис. 4.23).

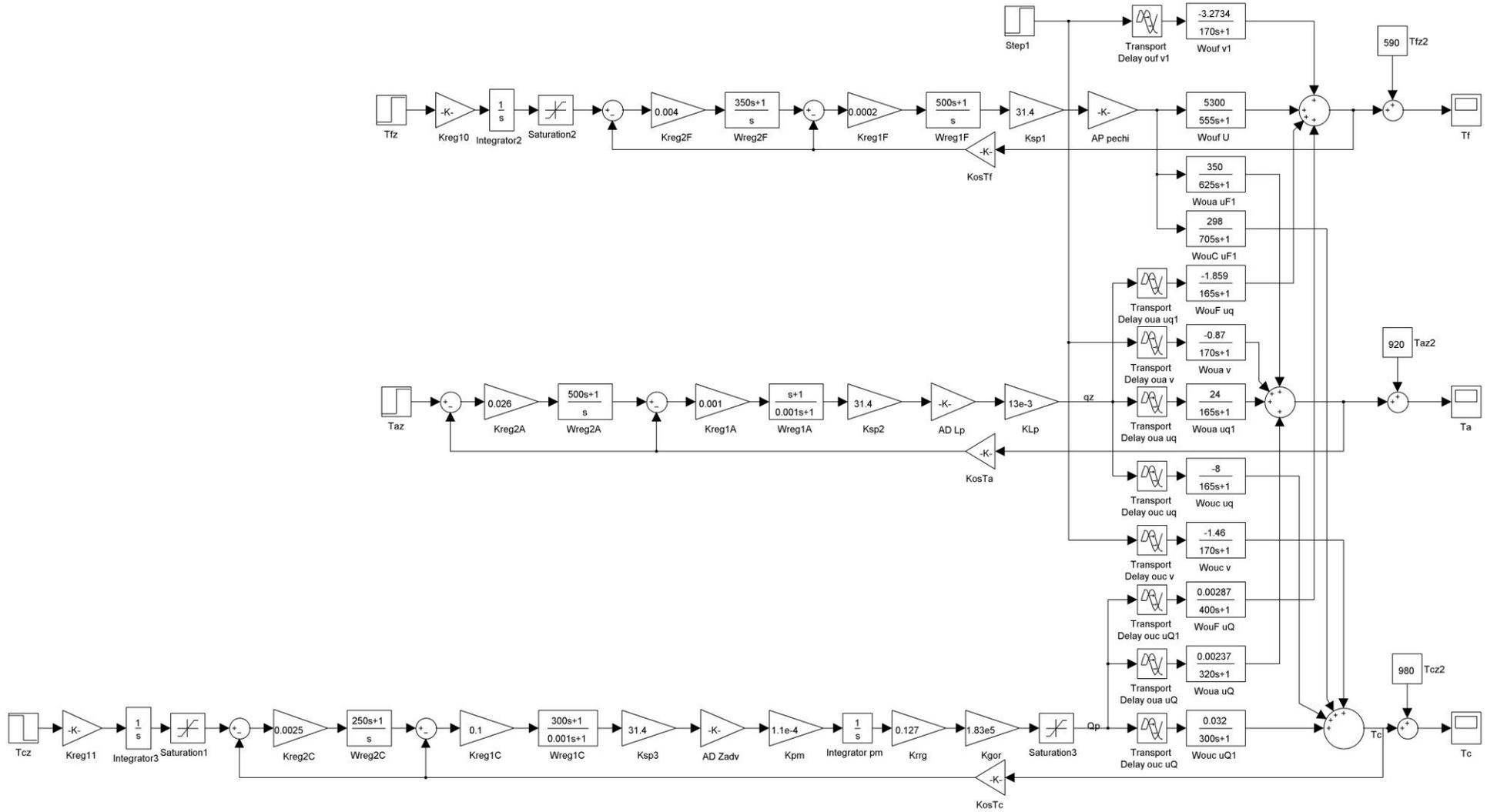
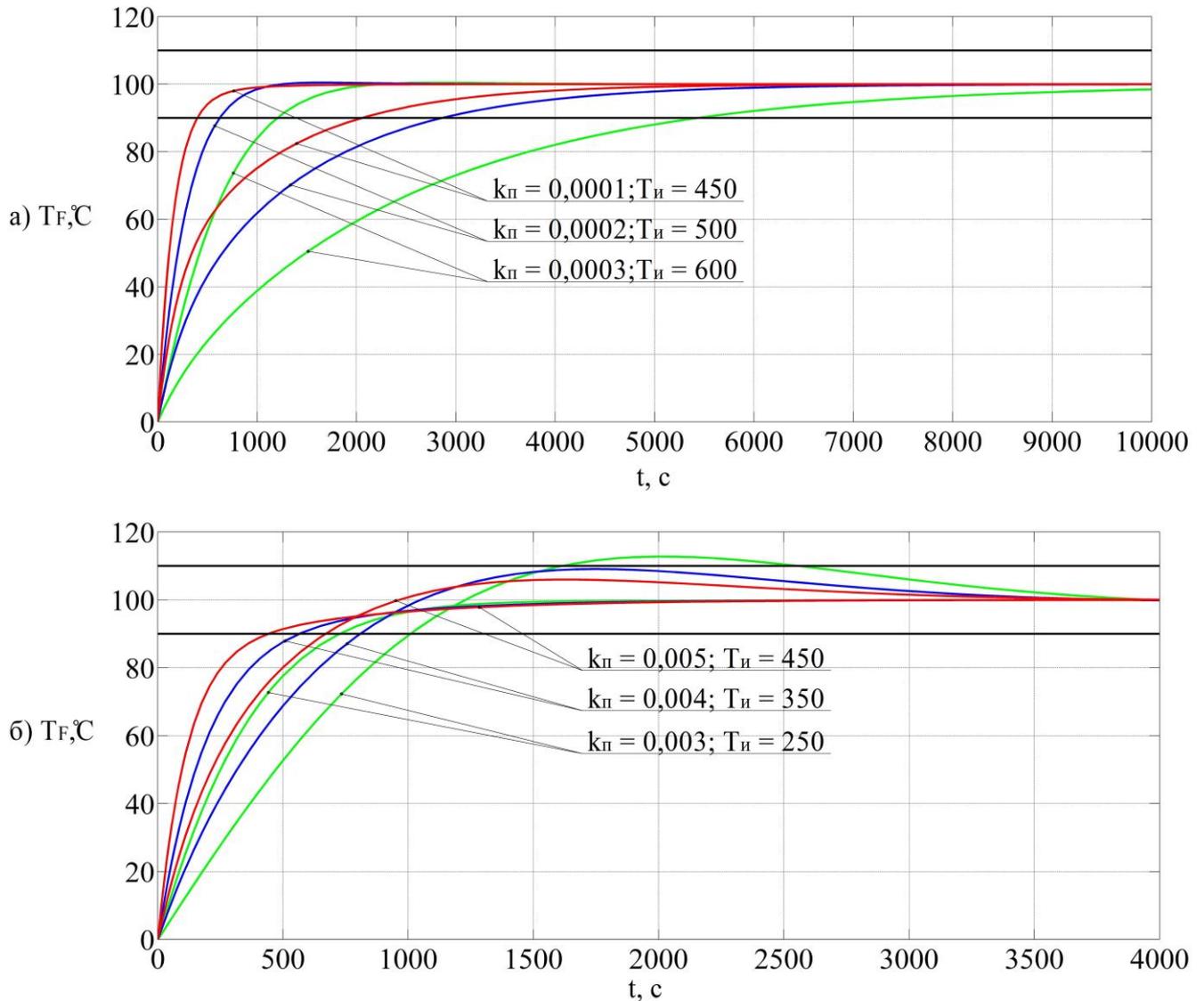


Рисунок 4.22 – Вычислительная модель многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита



а) в первом контуре б) во втором контуре

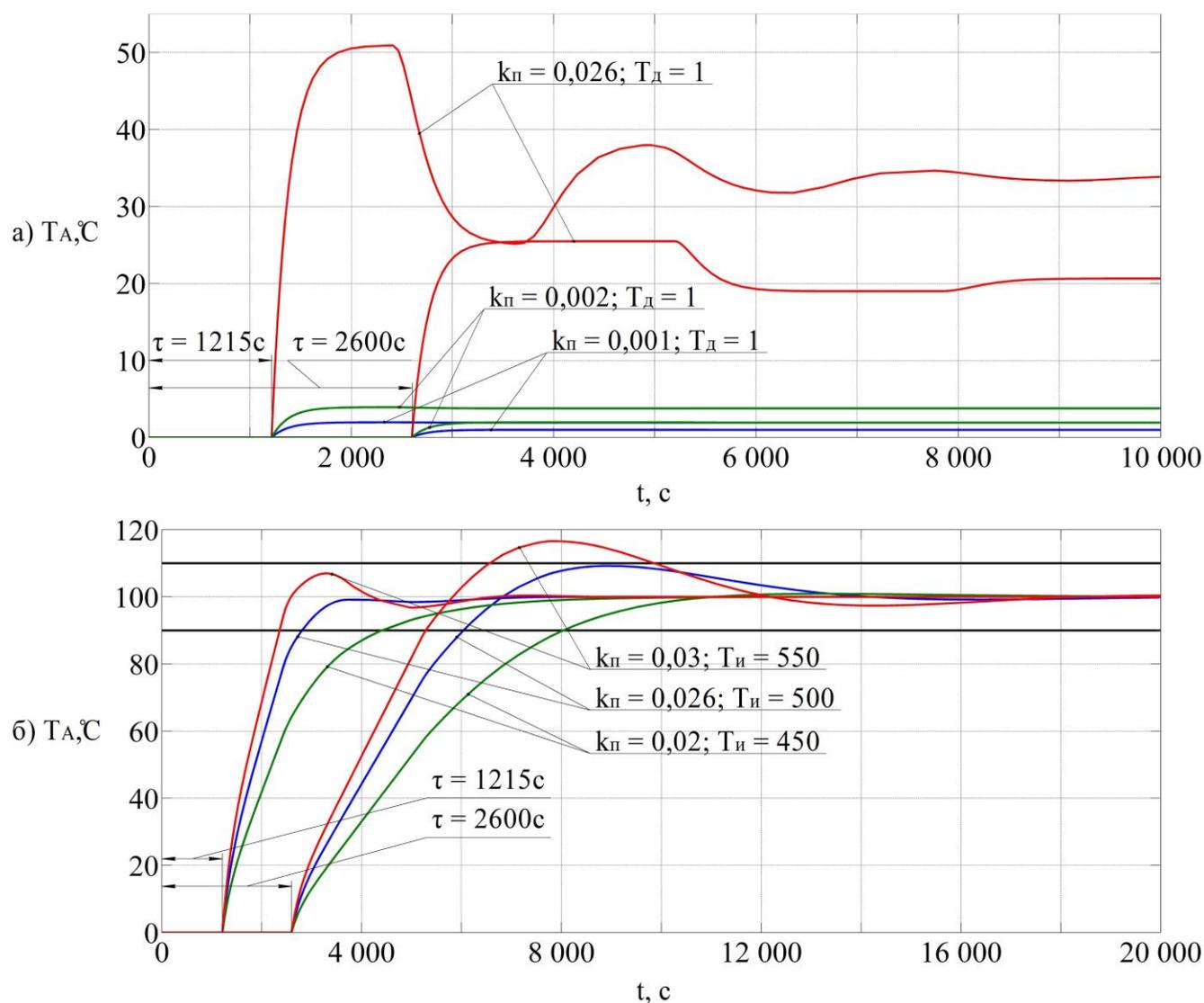
Рисунок 4.23 – Графики переходных процессов в САУ в канале F

Каналы стабилизации температуры в сечениях А и С содержат звенья запаздывания, поэтому используя основные подходы синтеза МСОИК производим настройку регуляторов этих систем применяя численный метод с использованием частотных характеристик в программной среде MATLAB. При этом с целью более простой технической реализации цифрового регулятора ограничимся двумя контурами.

В канале А, где запаздывание достигает 2600с, в первом контуре для увеличения быстродействия применён ПД регулятор с передаточной функцией

$$W_{R1}(p) = K_{\text{п}} \cdot \frac{T_{\text{ид}}p + 1}{p + 1}, \text{ при этом пропорциональная составляющая регулятора}$$

выбиралась в соответствии с критерием Найквиста, чтобы обеспечить необходимый запас устойчивости. Во втором контуре выбран ПИ-регулятор с передаточной функцией  $W_{R2}(p) = K_{2П} \cdot \frac{T_{2И}p + 1}{p}$ , для устранения статической ошибки. Так как в канале А существенно изменяются параметры объекта управления, поэтому настройка осуществлялась по крайним значениям коэффициента передачи, запаздывания и постоянной времени, чтобы обеспечить минимально возможное время переходного процесса при одинаковой настройке регуляторов. Подбор значений показал, что оптимальными величинами являются  $K_{1П} = 0,001$ ,  $T_{1Д} = 1$ ;  $K_{2П} = 0,026$ ,  $T_{2И} = 500$  (табл. 4.1) (рис. 4.24).



а) в первом контуре б) во втором контуре

Рисунок 4.24 – Графики переходных процессов в САУ в канале А

В канале стабилизации температуры в сечении С содержится интегрирующее звено, поэтому в первом контуре применён ПД регулятор с передаточной функцией  $W_{R1}(p) = K_{1П} \cdot \frac{T_{1Д}p + 1}{p + 1}$  и настроен на максимальное быстродействие, пропорциональная составляющая этого регулятора выбиралась по годографу в соответствии с критерием Найквиста, чтобы обеспечить необходимый запас устойчивости. Во втором контуре выбран ПИ-регулятор с передаточной функцией  $W_{R2}(p) = K_{2П} \cdot \frac{T_{2И}p + 1}{p}$ , для устранения статической ошибки. Подбор значений показал, что оптимальными величинами являются  $K_{1П} = 0,1$ ,  $T_{1Д} = 300$ ;  $K_{2П} = 0,0025$ ,  $T_{2И} = 250$  (табл. 4.1) (рис. 4.25).

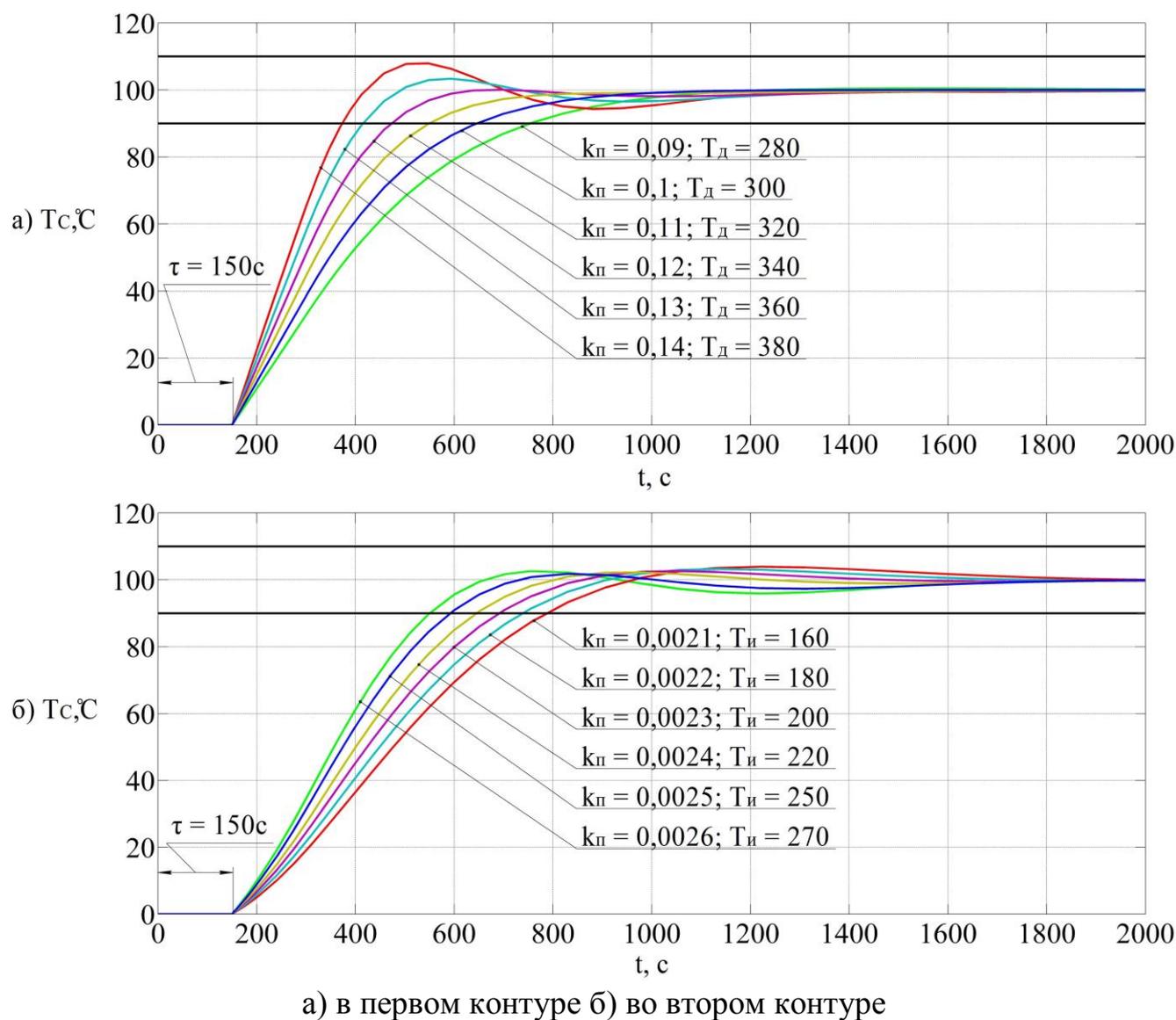


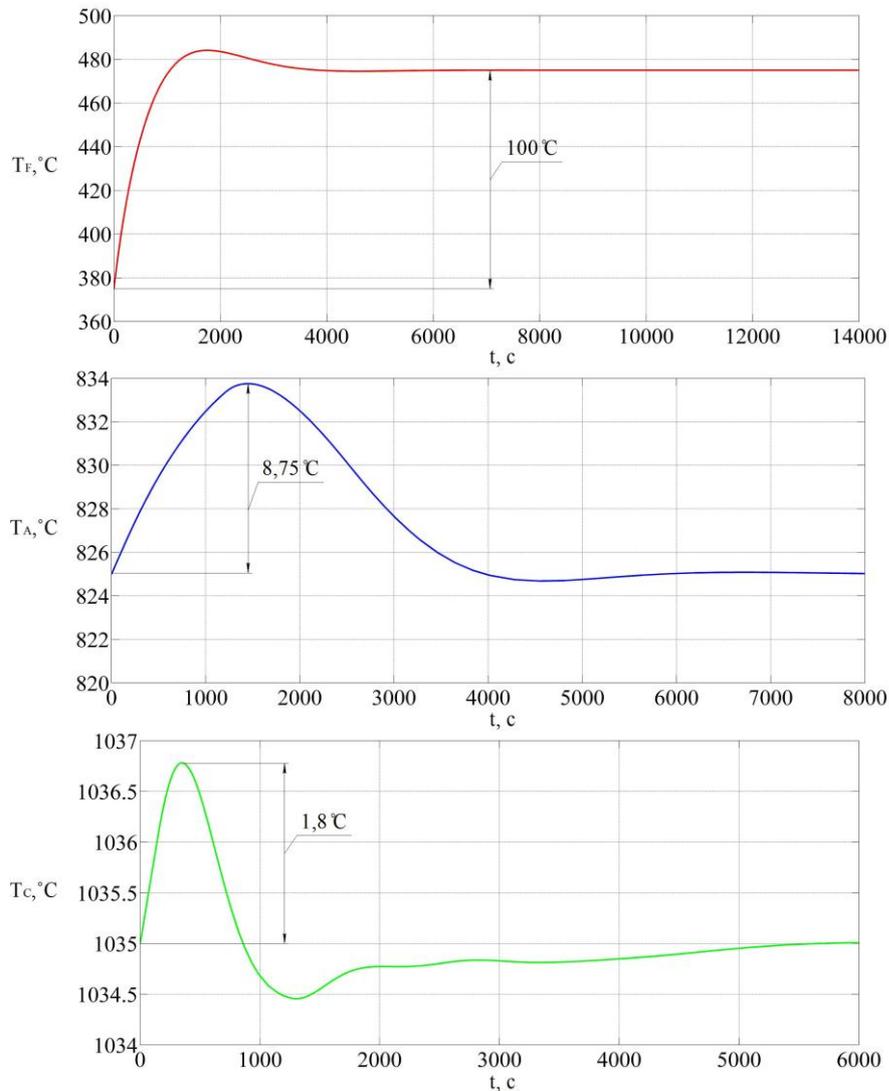
Рисунок 4.25 – Графики переходных процессов в САУ в канале С

Таблица 4.1 – Параметры регуляторов

САУ в сечении F	САУ в сечении A	САУ в сечении C
$K_{1П} = 0,0002$	$K_{1П} = 0,001$	$K_{1П} = 0,1$
$T_{1И} = 500$	$T_{1Д} = 1$	$T_{1Д} = 300$
$K_{2П} = 0,004$	$K_{2П} = 0,026$	$K_{2П} = 0,0025$
$T_{2И} = 350$	$T_{2И} = 500$	$T_{2И} = 250$

Для исследования МСАУ ТПОК поочерёдно подавались управляющие воздействия на каждый канал (F, A и C) с целью оценки переходных процессов с точки зрения влияния на процессы регулирования межканальных связей.

На вход системы стабилизации температуры в конце зоны сушки (канал F) в установившемся режиме подавалось скачкообразное управляющее воздействие  $\Delta T_F = 100^\circ\text{C}$  от начальной температуры  $T_F = 375^\circ\text{C}$ .

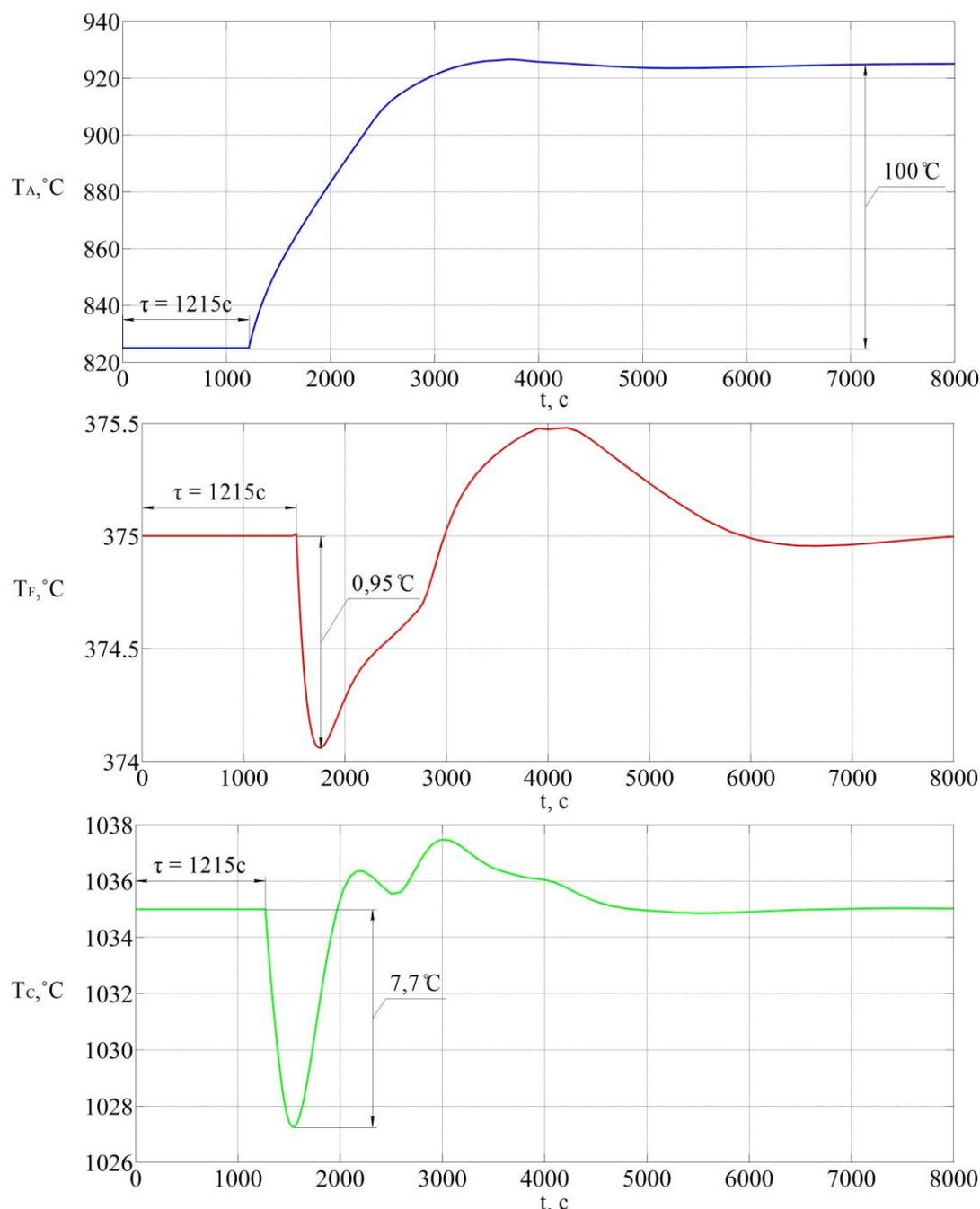


- а) при подаче управляющего воздействия в канал стабилизации температуры  $T_F$  в конце зоны сушки; б), в) от действия межканальных связей в каналах стабилизации  $T_A$  и  $T_C$  соответственно

Рисунок 4.26 – Графики переходных процессов

В результате получены графики переходных процессов (рис. 4.26), из анализа которых видно, что каналы стабилизации температур  $T_A$  и  $T_C$  реагируют на изменение управляющего воздействия в канале  $T_F$  как на возмущение, при этом в канале  $T_A$  динамический выброс составил  $\gamma = 8,75^\circ\text{C}$ , в канале  $T_C$   $\gamma = 1,8^\circ\text{C}$ .

На вход системы стабилизации температуры в конце зоны нагрева (канал А) в установившемся режиме подавалось скачкообразное управляющее воздействие  $\Delta T_A = 100^\circ\text{C}$  от начальной температуры  $T_A = 825^\circ\text{C}$ .

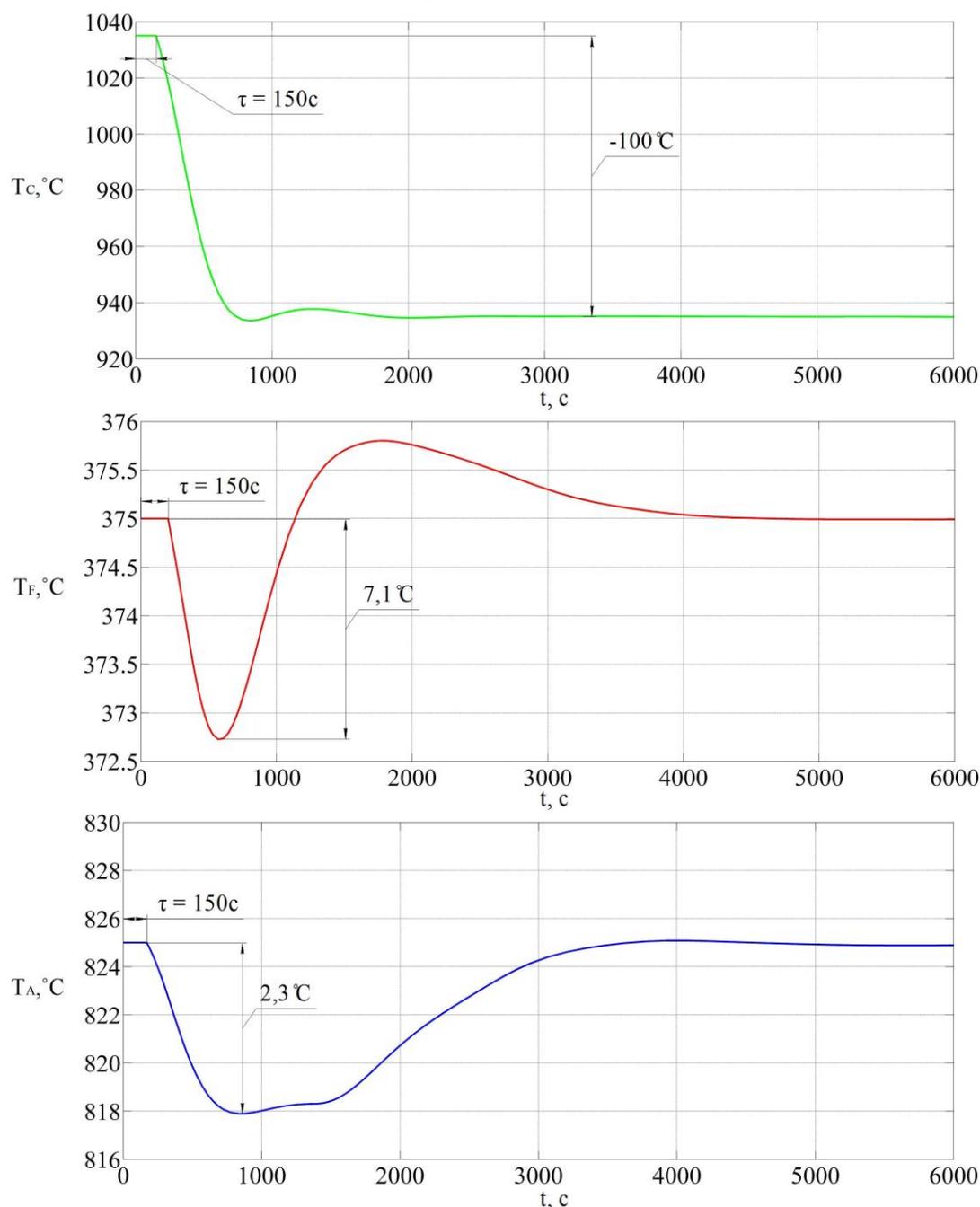


а) при подаче управляющего воздействия в канал стабилизации температуры  $T_A$  в конце зоны нагрева; б), в) от действия межканальных связей в каналах стабилизации  $T_F$  и  $T_C$  соответственно

Рисунок 4.27 – Графики переходных процессов

В результате получены графики переходных процессов (рис. 4.27), из анализа которых видно, что каналы стабилизации температур  $T_F$  и  $T_C$  реагируют на изменение управляющего воздействия в канале  $T_A$  как на возмущение, при этом в канале  $T_F$  динамический провал составил  $\gamma = 0,95^\circ\text{C}$ , в канале  $T_C$   $\gamma = 7,7^\circ\text{C}$ .

На вход системы стабилизации температуры в зоне вспучивания в установившемся режиме подавалось скачкообразное управляющее воздействие  $\Delta T_C = -100^\circ\text{C}$  от начальной температуры  $T_C = 1035^\circ\text{C}$ .



а) при подаче управляющего воздействия в канал стабилизации температуры  $T_C$  в зоне вспучивания; б), в) от действия межканальных связей в каналах стабилизации  $T_F$  и  $T_A$  соответственно

Рисунок 4.28 – Графики переходных процессов

В результате получены графики переходных процессов (рис. 4.28), из анализа которых видно, что каналы стабилизации температур  $T_F$  и  $T_A$  реагируют на изменение управляющего воздействия в канале  $T_C$  как на возмущение, при этом в канале  $T_F$  динамический провал составил  $\gamma = 2,3^\circ\text{C}$ , в канале  $T_A$   $\gamma = 7,1^\circ\text{C}$ .

В результате численного моделирования МСАУ ТПОК по оценке влияния межканальных связей, установлено, что эти связи оказывают положительный эффект позволяя сокращать время технологического перехода между марками керамзита по прочности, установлено, что влияние межканальных связей в объекте на сепаратные каналы управления обрабатывается этими сепаратными каналами МСАУ ТПОК за время  $500 \div 2500\text{с}$ , но при этом величина динамического выброса  $\gamma = 0,95^\circ\text{C} \div 8,75^\circ\text{C}$ , что составляет всего  $1 \div 9\%$  по сравнению с величинами управляющих воздействий в сепаратных каналах.

Численное моделирование по управлению [41] заключались в моделировании технологического перехода с одной марки по прочности на другую, путём изменения температур  $T_F$ ,  $T_A$  и  $T_C$  в сечениях F, A и C соответственно. Причём линейно нарастающий сигнал в каналах F и C (рис. 4.22) задавался так, чтобы положительный эффект от действия межканальных связей был максимальным и переходной процесс в каналах F и C заканчивался одновременно с самым длительным по времени переходным процессом канала A. Переход между марками П200 – П250; П250 – П300; П300 – П350 показан на рисунках 4.29 – 4.31 соответственно.

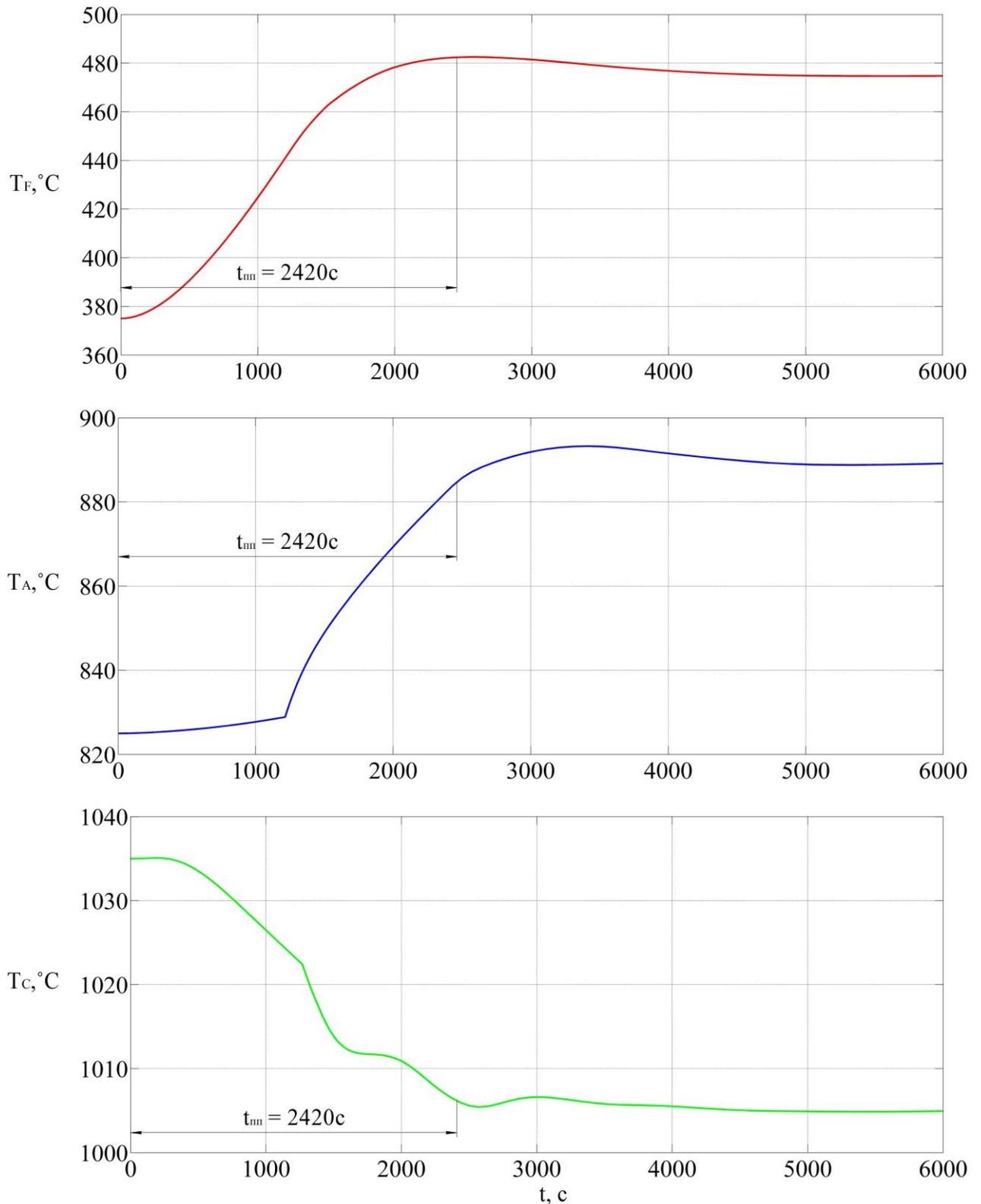


Рисунок 4.29 – Графики переходных процессов при переходе с марки П200 на марку П250

В результате (рис. 4.29) время переходного процесса между марками П200 – П250 керамзита (по прочности) составило  $t_{т.п} = 2420\text{c}$  ( $\approx 40$ мин), что в 1,5 раза меньше времени 60мин затрачиваемого оператором при переходе «вручную».

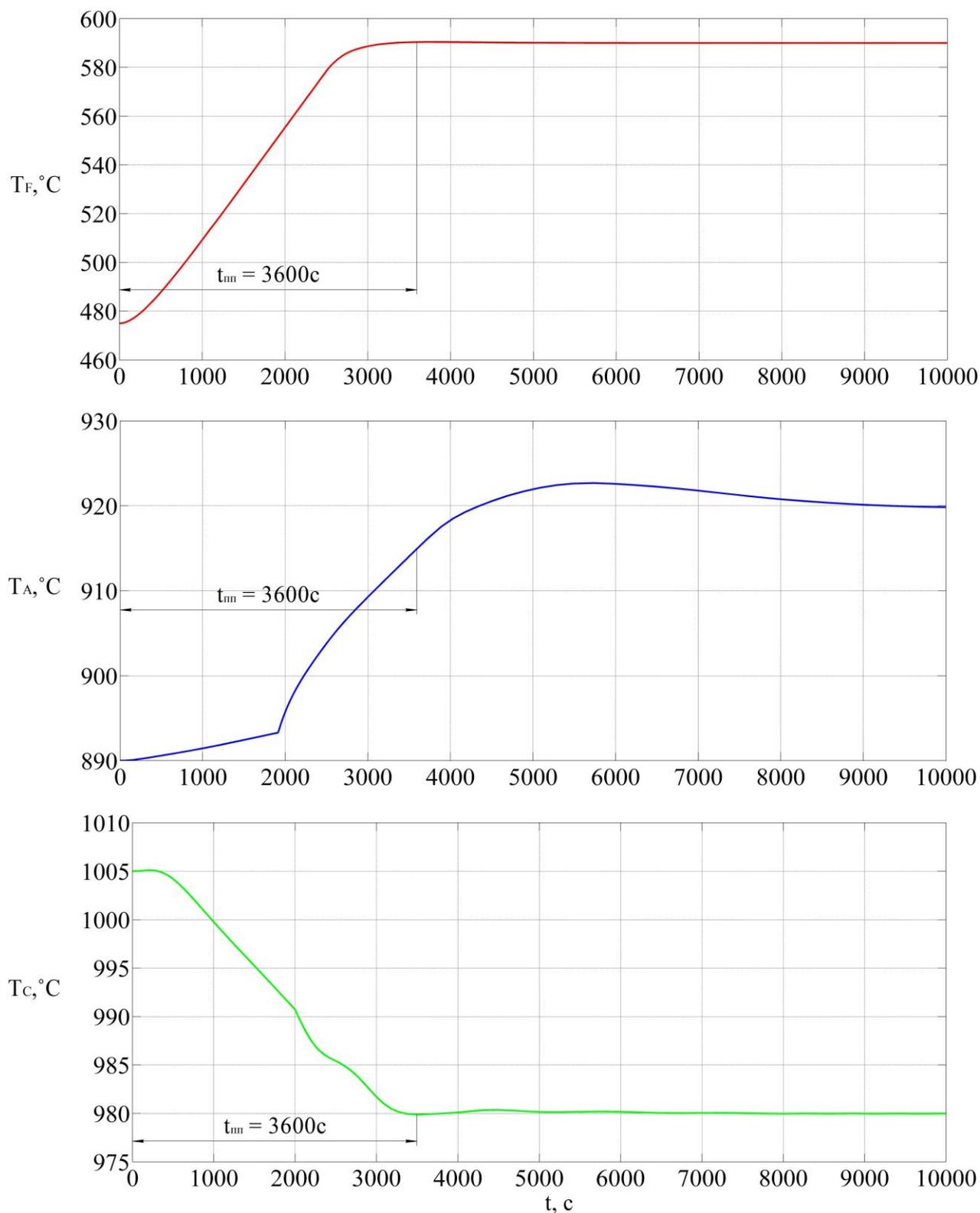


Рисунок 4.30 – Графики переходных процессов при переходе с марки П250 на марку П300

В результате (рис. 4.30) время переходного процесса между марками П250 – П300 керамзита (по прочности) составило  $t_{п.п} = 3600\text{c}$  (60мин), что в 1,5 раза меньше времени 90мин затрачиваемого оператором при переходе «вручную».

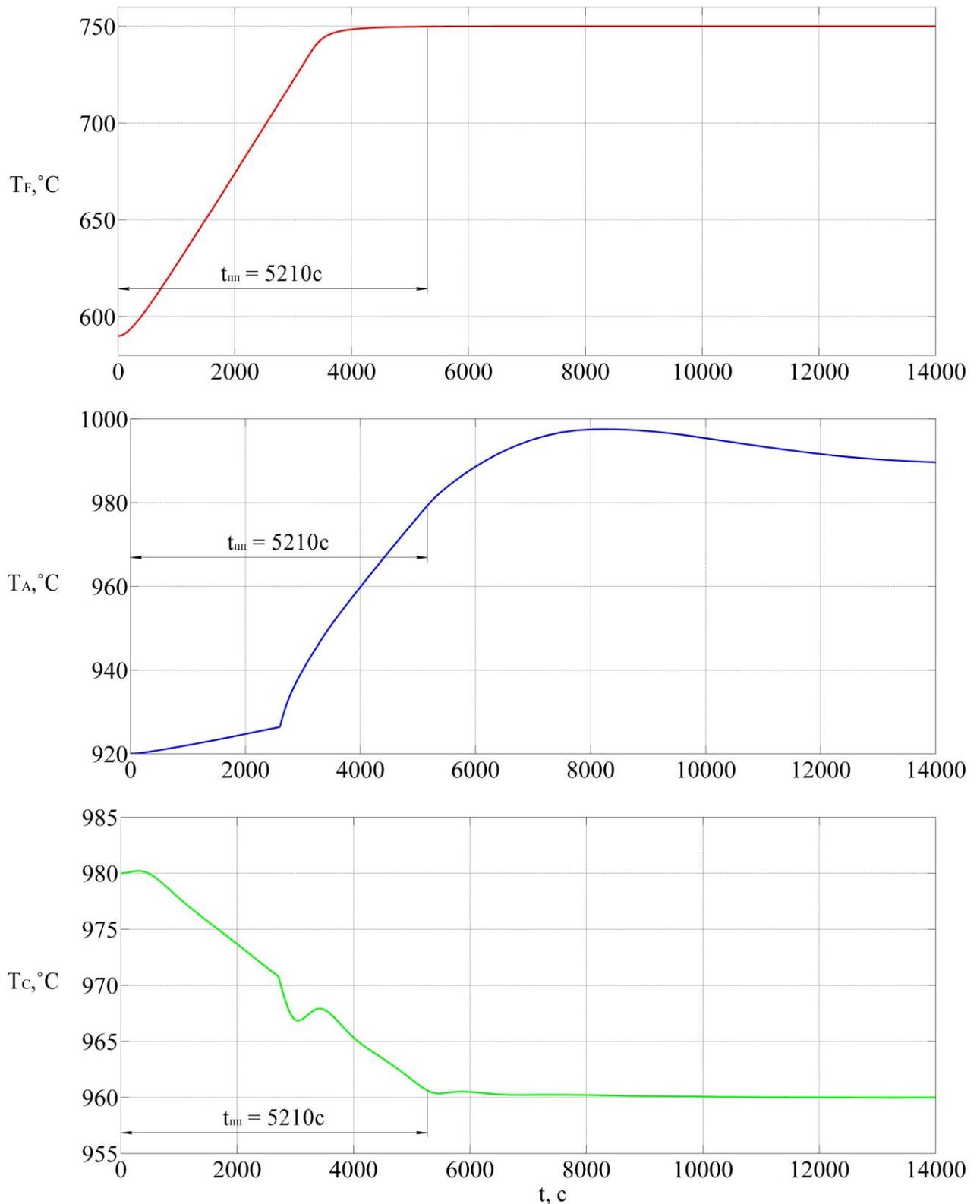
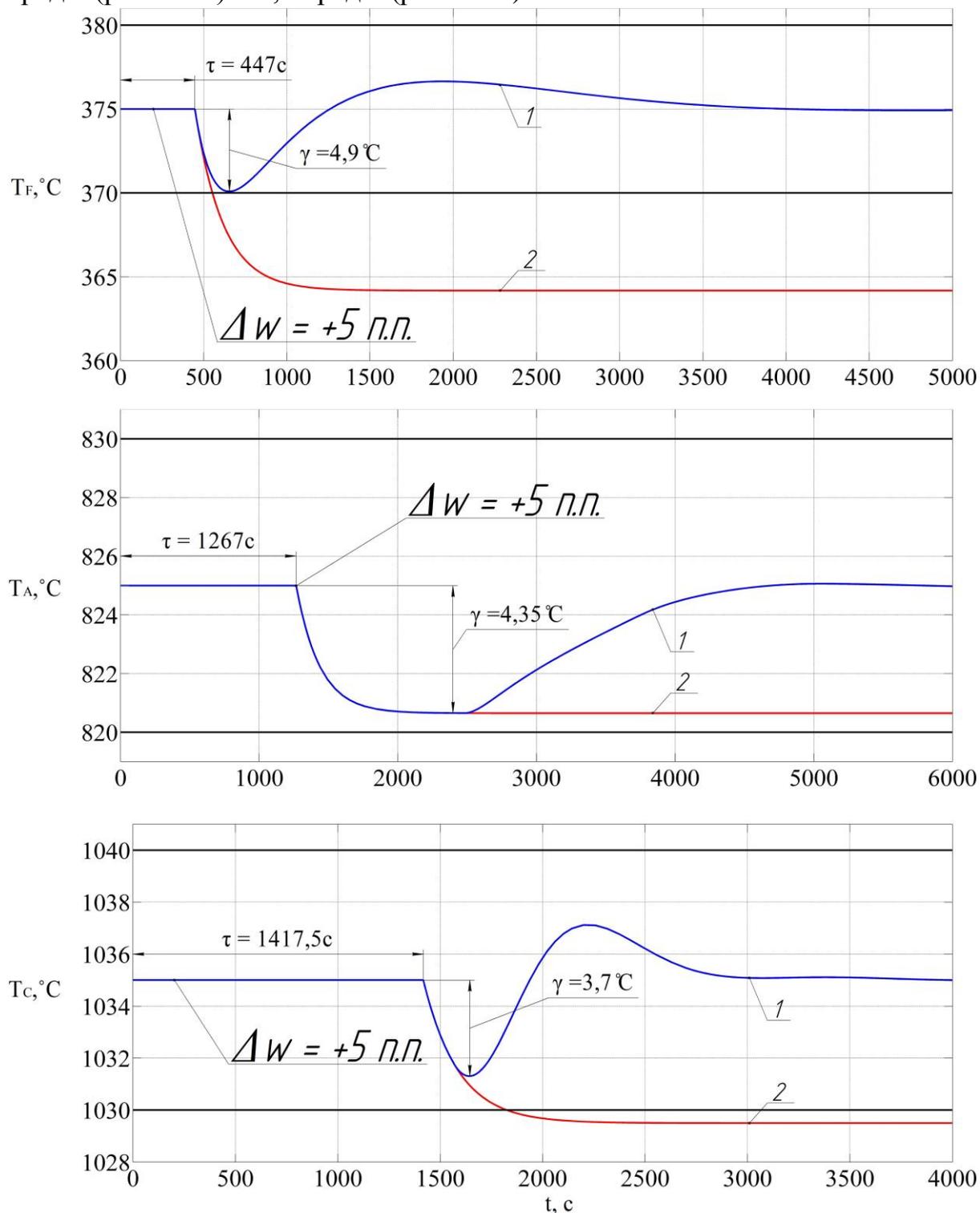


Рисунок 4.31 – Графики переходных процессов при переходе с марки П300 на марку П350

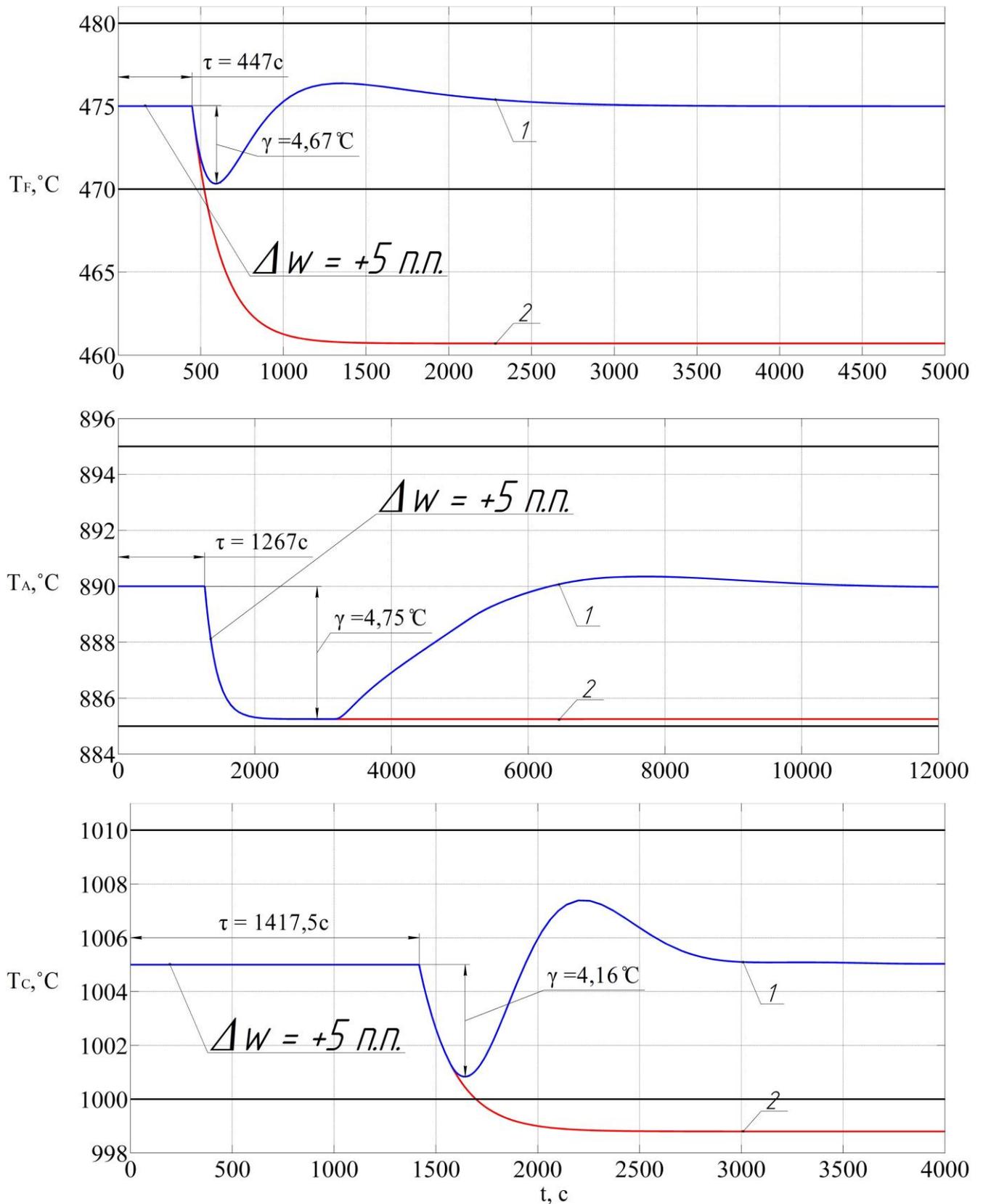
В результате (рис. 4.31) время переходного процесса между марками П300 – П350 керамзита (по прочности) составило  $t_{п.п} = 5210\text{c}$  ( $\approx 87$ мин), что в 1,4 раза меньше времени 120мин затрачиваемого оператором при переходе «вручную».

Для оценки работы МСАУ ТПОК по отношению к возмущающему воздействию на входы каналов F, A и C скачкообразно подавалось – изменение влажности сырца  $\Delta w = 5$  п.п. (процентных пунктов) от нормальной влажности  $w = 15\%$  при трёх значениях скорости вращения  $\omega_{п}$  печи: 0,26 рад/с (рис. 4.32), 0,13 рад/с (рис. 4.33) и 0,08 рад/с (рис. 4.34).



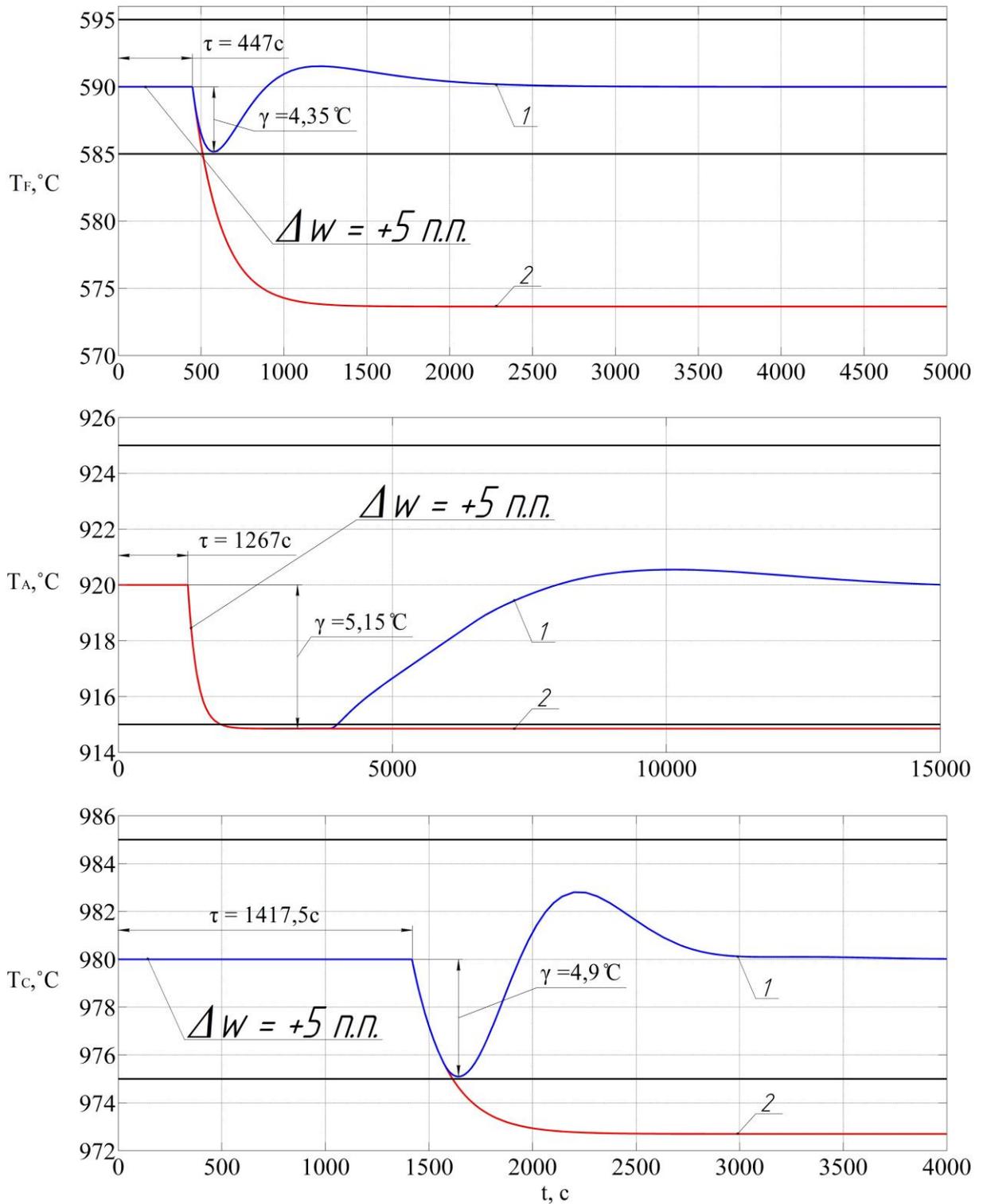
1 – в САУ; 2 – в объекте управления

Рисунок 4.32 – Графики переходных процессов по отношению к возмущающему воздействию  $w$  при скорости вращения  $\omega_{п}$  печи 0,26 рад/с в каналах F, A и C соответственно



1 – в САУ; 2 – в объекте управления

Рисунок 4.33 – Графики переходных процессов по отношению к возмущающему воздействию  $w$  при скорости вращения  $\omega_{п}$  печи 0,13 рад/с в каналах F, A и C соответственно

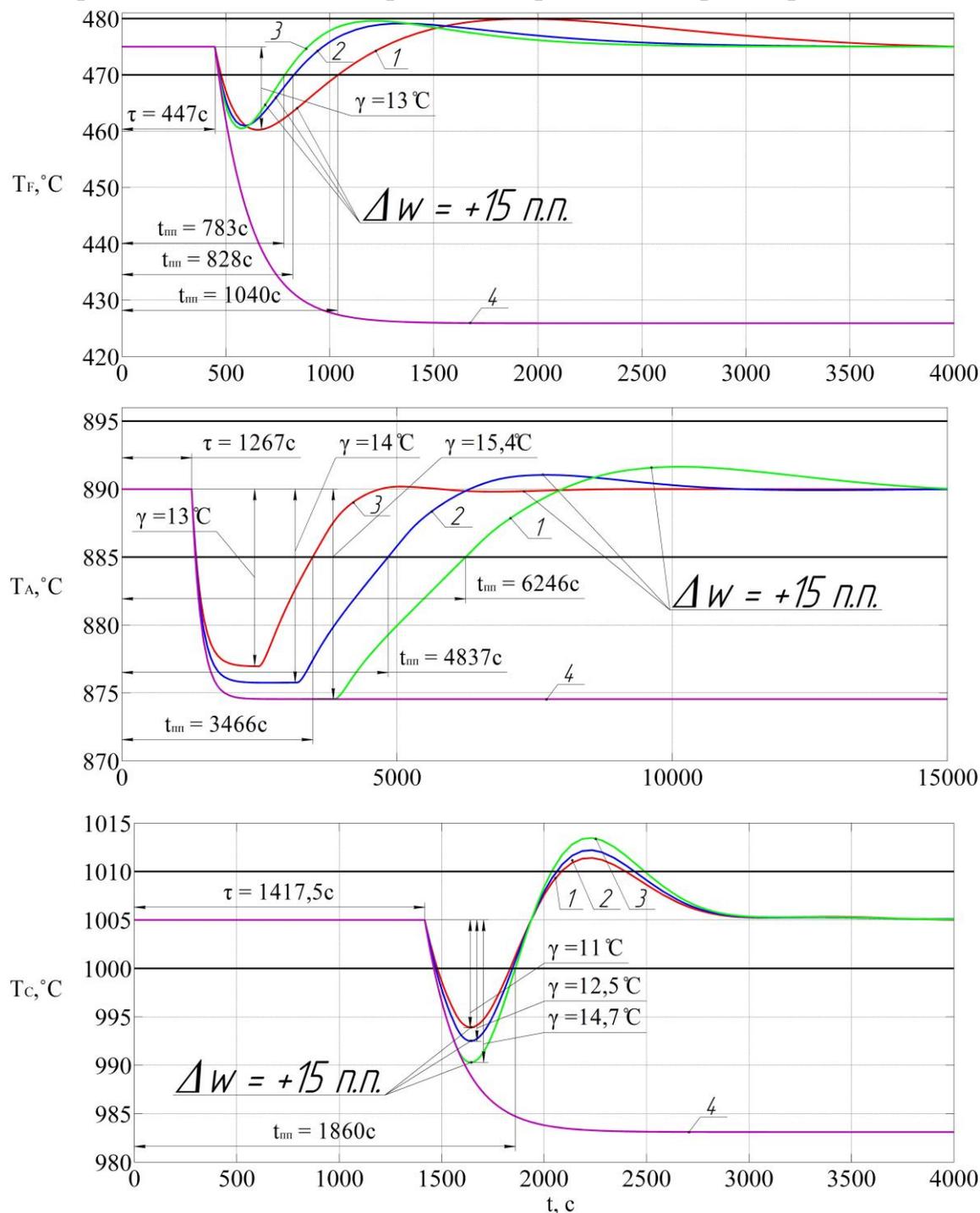


1 – в САУ; 2 – в объекте управления

Рисунок 4.34 – Графики переходных процессов по отношению к возмущающему воздействию  $w$  при скорости вращения  $\omega_n$  печи  $0,08 \text{ рад/с}$  в каналах F, A и C соответственно

В результате получены графики переходных процессов по возмущению. Величины динамических провалов составили  $\gamma = 3,7 \div 5,15^\circ\text{C}$ , что практически не превышает заданных в главе 3 требований об отклонении температуры в пределах  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

Для оценки устойчивости системы подадим максимально возможное значение возмущающего воздействия на входы каналов F, A и C скачкообразно изменив влажность сырца на  $\Delta w = 15$  п.п. (что случается в технологическом процессе крайне редко, например, при загрузке сырца без использования сушильного барабана) от нормальной влажности  $w = 15\%$  при трёх значениях скорости вращения  $\omega_n$  печи: 0,26 рад/с, 0,13 рад/с и 0,08 рад/с (рис. 4.35).



1 – в САУ при  $\omega_n = 0,26$  рад/с; 2 – в САУ при  $\omega_n = 0,13$  рад/с;  
3 – в САУ при  $\omega_n = 0,08$ ; 4 – в объекте управления

Рисунок 4.35 – Графики переходных процессов по отношению к возмущающему воздействию  $w$

В результате подачи максимально возможного значения возмущения видно (рис. 4.35), что величины динамических провалов составили  $\gamma = 11 \div 15,4^\circ\text{C}$ , что приводит к получению другой марки керамзита, относительно заданной, но при этом система обрабатывает поданное возмущение за время  $t_{\text{п.п}} = 1860 \div 6246\text{с}$  ( $\approx 31 \div 104$ мин), что приводит к меньшему количеству брака (при большей точности) по сравнению с «ручным» управлением оператора вращающейся печи за время  $60 \div 120$ мин.

Проведённое численное моделирование показало, что в разработанной МСАУ ТПОК все три канала стабилизации температуры в сечениях  $T_F$ ,  $T_A$  и  $T_C$  работают достаточно быстро, время переходных процессов по управлению при переходах между марками керамзита (по прочности) составило  $t_{\text{п.п}} = 2420 \div 5210\text{с}$  ( $\approx 40 \div 87$ мин), что в 1,5 раза меньше времени, затрачиваемого на аналогичные переходы осуществляемые оператором «вручную» –  $60 \div 120$ мин, при том, что технологический процесс обжига керамзита длится  $40 \div 80$ мин (в зависимости от скорости вращения печи). Межканальное влияние обрабатывается МСАУ ТПОК и отклонения находятся в диапазоне  $0,95^\circ\text{C} - 8,75^\circ\text{C}$ , что составляет  $1 \div 9\%$  по сравнению с величинами управляющих воздействий в сепаратных каналах. Величина динамического провала по возмущению составила  $\gamma = 3,7 \div 5,15^\circ\text{C}$ , что практически не превышает заданных в главе 3 требований об отклонении температуры в пределах  $\pm 5^\circ\text{C}$ . При этом статическая ошибка МСАУ ТПОК, ввиду применения интегральной составляющей в регуляторах, равна нулю, погрешность на реальной установке будет определяться точностью термопары, которая составляет  $\pm 1^\circ\text{C}$  [131,132] и суммарной погрешностью преобразователя (цифровая погрешность и влияние температуры на цифровой сигнал)  $\pm 0,23^\circ\text{C}$  [133]. В результате погрешность составит  $\pm 1,23^\circ\text{C}$ , что не выходит за рамки предъявленных нами требований по точности поддержания температуры  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Погрешность по прочности составит  $R = \pm 0,126\text{МПа}$ , что не превышает 5%. Данные результаты показывают эффективность согласованного управления синтезированной МСАУ ТПОК, поскольку опытный оператор при «ручном» или

автоматизированном управлении, ориентируясь визуально на движение керамзита [1] и показания пирометра, допускает погрешность  $\pm 10,25 \div 17,75^\circ\text{C}$  [134], что является критическим, поскольку длительное изменение температуры сырца керамзита на  $15^\circ\text{C}$  [7,82] приводит к существенному изменению насыпной плотности и прочности и, следовательно, к другой марке керамзитового гравия (при том, что 2/3 печи с «холодного» конца визуально не просматриваются [1], и как минимум контроль за температурой в сечении F оператор осуществить не может), тратит время на принятие решения, в результате чего переход с производства одной марки на выпуск другой составляет от 60 до 120 мин, что значительно больше времени  $40 \div 87$  мин, требующегося синтезированной системе автоматического управления.

#### **4.5 Техническая реализация МСАУ ТПОК**

Для автоматического управления обжигом керамзита во вращающейся печи необходимо измерение температуры керамзита в нескольких сечениях по её длине [33,135]. Ввиду того, что печь вращается и технологический процесс протекает при достаточно высоких температурах ( $300-1200^\circ\text{C}$ ), разработана конструкция крепления датчиков в печи. Она представляет собой термопару в защитном кожухе (рис. 4.36), которая вставлена в стакан, приваренный четырьмя уголками к наружной поверхности вращающейся печи. Аналогичные конструкции были известны и ранее [10], но имели при этом ряд недостатков, подробно рассмотренных в [43], поэтому предлагается устанавливать термопары, вровень с футеровкой, поскольку проведённое численное моделирование, показало целесообразность такого подхода. Для отправки измеренных значений температур на приёмник предлагается использовать беспроводной преобразователь Rosemount 648 [85,133,136]. Он устанавливается в труднодоступных местах и позволяет надёжно передавать измеренные параметры от термоэлектрических преобразователей (ТП) путём их преобразования в радиосигнал частотой 2,4 ГГц

и отправки в информационную систему через беспроводной шлюз Rosemount 1420. Использование беспроводных приборов для измерения параметров технологических процессов позволяет увеличить количество собираемой информации для более эффективного управления.

Rosemount 648 помещён в стальной цилиндр, закреплённый на двутавре, который в свою очередь приваривается к вращающейся печи (рис. 4.36). Корпус преобразователя Rosemount 648 состоит из двух отсеков: отсек электроники и клеммный отсек. Отсеки герметично изолированы друг от друга, что повышает надёжность работы Rosemount 648 в жестких промышленных условиях [133]. В отсеке электроники расположен электронный блок, преобразующий входной сигнал в выходной радиосигнал. В клеммном отсеке расположены клеммы для подключения входного сигнала и модуль питания. На корпусе преобразователя Rosemount 648 расположена всенаправленная антенна, предназначенная для приема и передачи радиосигнала.

К клеммному отсеку подключен первичный преобразователь Rosemount 1075 [131], представляющий собой термоэлектрический преобразователь – термопары типа S: Pt/Rh (+) и Pt (-), которые применяются для преобразования температуры в ЭДС. Преобразователь (термопара) Rosemount 1075 предназначен для непрерывного измерения температуры в газообразных агрессивных средах в температурном диапазоне 0...1600°C. Предел допускаемой основной погрешности,  $\pm 1^\circ\text{C}$  [131,132]. Он является пассивным датчиком, т.к. не имеет внешнего источника питания, а напряжение вырабатывает в качестве отклика на изменение температуры. Также он относится к классу относительных датчиков, потому что его выходное напряжение обуславливается разностью температур между двумя спаями и практически не зависит от абсолютной температуры каждого соединения. При измерении температуры с использованием термопары значение одного из её спаев является эталоном, а значение второго спая сравнивается с ним.



Рисунок 4.36 – Конструкция крепления термопар и преобразователей Rosemount 648 на вращающейся печи

Выходной радиосигнал поступает на беспроводной шлюз Rosemount 1420, который является главным узлом самоорганизующейся беспроводной сети SmartWireless. Число поддерживаемых им одновременных соединений с беспроводными измерительными приборами составляет 100шт, также шлюз контролирует сеть, безопасность передачи данных и интеграцию их в систему верхнего уровня. Шлюз является приёмником радиосигналов (на рабочей частоте 2,4 – 2,5 ГГц по протоколу WirelessHART) от беспроводных приборов, которые впоследствии преобразуются в формат, совместимый с различными системами управления, поддерживает одновременное подключение до 100 беспроводных измерительных приборов [131].

Термопары подключаются к преобразователям, таких комплектов, состоящих из термопары и преобразователя три. Один – на расстоянии 11 м (сечение F), второй – на 30 м (сечение A), третий – 35 м (сечение C) от холодного торца печи. Предлагаемая конструкция крепления датчиков позволяет наблюдать температуру непосредственно в конкретном сечении печи.

Для проверки эксплуатационных свойств в программной среде SolidWorks было проведено компьютерное моделирование предлагаемой конструкции (рис. 4.36), которое заключалось в прочностном расчёте сварного шва уголков, объединяющих стакан конструкции с барабаном вращающейся печи и расчёте толщины теплоизоляционного цилиндра в соответствии с методиками [137-139], результаты приведены в [6,135].

Спроектированная конструкция обладает достаточной износостойкостью, теплоизоляцией и обеспечивает длительное использование с обслуживанием 1 раз в год во время плановой остановки вращающейся печи.

Управления газовой горелкой осуществляется при помощи [140]:

- блока розжига запальника БРЗ-04М1-2К – для автоматического управления процессом розжига ЗЗУ, контроля пламени запальника и горелки. Связь с контроллерами осуществляется по интерфейсу RS-485;

- блока защиты и контроля микропроцессорного БЗК-М – индикация состояния технологической установки по двенадцати параметрам, контроля факела горелок по трём каналам и выдачи звукового сигнала и отключения подачи топлива в случае аварии по какому-либо параметру;

- шкафа управления ПРОМА-РТИ-304;

- заслонки газовой с электроприводом – ЗГП 100.

Для ТПОК выбраны двигатели АДЧР из каталога [141]:

- 1) для главного привода вращающейся печи – АДЧР225М8УЗДВНЗ (табл. 4.2), для вспомогательного привода вращающейся печи – АДЧР112МА8УЗТДВНЗ

- 2) для ленточного питателя – АДЧР80МА2УЗДВНЗ (табл. 4.3),

- 3) для привода ЗГП-100 [140] газовой горелки С199-08-100 – АДЧР63В2УЗДВНЗ (табл. 4.4).

Таблица 4.2 – Параметры асинхронного двигателя АДЧР225М8УЗДВНЗ [141] вращающейся печи

Номинальная мощность $P_n$ , кВт	30
Синхронная частота вращения $n_c$ , об/мин	750
КПД двигателя $\eta_{дв}$ , %	90,5
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,81
Номинальное напряжение $U_n$ , В	380
Частота питающей сети $f_1$ , Гц	50
Номинальное скольжение $s_n$	0,018
Момент инерции $J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	0,74
Число пар полюсов $p_n$	4
Параметры схемы замещения	
Активное сопротивление статора $r_1$ , Ом	0,1517
Активное сопротивление ротора, приведённое к статору $r'_2$ , Ом	0,0705
Реактивное сопротивление статора $x_1$ , Ом	0,4046
Реактивное сопротивление ротора, приведённое к статору $x'_2$ , Ом	0,5448
Реактивное сопротивление главного потока $x_\mu$ , Ом	8,1603

Таблица 4.3 – Параметры асинхронного двигателя АДЧР80МА2У3ДВНЗ [141] ленточного питателя

Номинальная мощность $P_n$ , кВт	1,5
Синхронная частота вращения $n_c$ , об/мин	3000
КПД двигателя $\eta_{дв}$ , %	81
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,85
Номинальное напряжение $U_n$ , В	380
Частота питающей сети $f_1$ , Гц	50
Номинальное скольжение $s_n$	0,042
Момент инерции $J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	0,0018
Число пар полюсов $p_n$	1
Параметры схемы замещения	
Активное сопротивление статора $r_1$ , Ом	0,0823
Активное сопротивление ротора, приведённое к статору $r'_2$ , Ом	0,0471
Реактивное сопротивление статора $x_1$ , Ом	0,05
Реактивное сопротивление ротора, приведённое к статору $x'_2$ , Ом	0,0778
Реактивное сопротивление главного потока $x_\mu$ , Ом	2,5

Таблица 4.4 – Параметры асинхронного двигателя АДЧР63В2У3ДВНЗ [141] блока управления газовой горелкой

Номинальная мощность $P_n$ , кВт	0,55
Синхронная частота вращения $n_c$ , об/мин	3000
КПД двигателя $\eta_{дв}$ , %	73
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,86
Номинальное напряжение $U_n$ , В	380
Частота питающей сети $f_1$ , Гц	50
Номинальное скольжение $s_n$	0,085
Момент инерции $J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	0,0009
Число пар полюсов $p_n$	1
Параметры схемы замещения	
Активное сопротивление статора $r_1$ , Ом	0,1275
Активное сопротивление ротора, приведённое к статору $r'_2$ , Ом	0,0923
Реактивное сопротивление статора $x_1$ , Ом	0,0481
Реактивное сопротивление ротора, приведённое к статору $x'_2$ , Ом	0,0798
Реактивное сопротивление главного потока $x_\mu$ , Ом	2,5

Выбранные двигатели оснащены инкрементальными энкодерами и независимым охлаждением, также вспомогательный двигатель оснащён тормозом для проведения футеровочных работ.

В соответствии с мощностями приводных двигателей вращающейся печи, ленточного питателя и газовой горелки в качестве управляемых преобразователей предлагается использовать силовые преобразователи частоты производства Schneider Electric Altivar 900 ATV950D37N4, Altivar 312 ATV312HU15N4B, Altivar 312 ATV312H055N4B соответственно [142,143]. Преобразователи поставляются в виде моноблоков, их параметры представлены в таблицах 4.5 – 4.7.

Таблица 4.5 – Параметры СПЧ ATV950D37N4

Параметры	ATV950D37N4
Мощность двигателя	до 37 кВт
Номинальное напряжение питания	380 В
Частота сети питания	50...60Гц (- 5...5 %)
Число фаз сети	3 фазы
Линейный ток	84 А для 380 В 3 фазы 37 кВт
Полная мощность	55,3кВ·А
Макс. переходной ток	118,5 А для 60 с 3 фазы
Рассеиваемая мощность	61 Вт при номинальной нагрузке
Степень защиты IP	IP20 на верхней части без закрывающей пластины IP41 на верхней части IP54 на нижней части
Пределы напряжения питания	323 – 550 В
Пределы частоты сети	47,5 – 63 Гц
Переходная перегрузка по вращающему моменту	170 % от номинального крутящего момента электродв +/- 10 % для 60 с 220 % от номинального крутящего момента электродв +/- 10 % для 2 с
Масса продукта	37 кг

Таблица 4.6 – Параметры СПЧ ATV312HU15N4B

Параметры	ATV312HU15N4B
Мощность двигателя	1,5 кВт
Номинальное напряжение питания	380...500 В (- 15...10 %)
Частота сети питания	50...60Гц (- 5...5 %)
Число фаз сети	3 фазы
Линейный ток	6,4А для 380 В
Полная мощность	4,2 кВ·А
Макс. переходной ток	6,2 А для 60 с
Рассеиваемая мощность	61 Вт при номинальной нагрузке

Параметры	ATV312HU15N4B
Степень защиты IP	IP41 на верхней части IP31 на верхней части IP20 на верхней части без закрывающей пластины
Пределы напряжения питания	323 – 550 В
Пределы частоты сети	47,5 – 63 Гц
Переходная перегрузка по вращающему моменту	170...200 % от номинального крутящего момента электродвигателя
Габаритные размеры (В×Ш×Г) мм	143×107×152
Масса продукта	1,8 кг

Таблица 4.7 – Параметры СПЧ ATV312H055N4B

Параметры	ATV312H055N4B
Мощность двигателя	0,55 кВт
Номинальное напряжение питания	380...500 В (- 15...10 %)
Частота сети питания	50...60Гц (- 5...5 %)
Число фаз сети	3 фазы
Линейный ток	2,8А для 380 В
Полная мощность	1,8 кВт·А
Макс. переходной ток	2,9 А для 60 с
Степень защиты IP	IP41 на верхней части IP31 на верхней части IP20 на верхней части без закрывающей пластины
Пределы напряжения питания	323 – 550 В
Пределы частоты сети	47,5 – 63 Гц
Переходная перегрузка по вращающему моменту	170...200 % от номинального крутящего момента электродвигателя
Габаритные размеры (В×Ш×Г) мм	143×107×152
Масса продукта	1,8 кг

В качестве управляющего устройства предлагается использовать контроллер SIMATIC S7-1500 фирмы Siemens [144]. Он имеет модульную конструкцию, возможность применения структур локального и распределенного ввода-вывода, широкие коммуникационные возможности, множество функций, поддерживаемых на уровне операционной системы. Удобство эксплуатации и обслуживания обеспечивают возможность получения рентабельных решений для построения систем автоматического управления в различных областях промышленного производства. К центральному процессору CPU 1518F-4 PN/DP

(табл. 4.8) программируемого контроллера S7-1500 подключаются блок питания PM 1507 и шина PROFIBUS для обмена данными между ведущим и ведомыми устройствами.

Таблица 4.8 – Параметры CPU 1518F-4 PN/DP

Параметры	CPU 1518F-4 PN/DP
Рабочая память, RAM:	
для выполнения программ	4.5 МБ
для хранения данных	10 МБ
Загрузочная память: SIMATIC Memory card	до 32 Гбайт
Время выполнения операций, нс:	
- логических	1
- с фиксированной точкой	2
- с плавающей точкой	6
Кол-во флагов/ таймеров, счетчиков	131072/ 2 048/ 2 048
Количество модулей ввода-вывода на систему, не более	8192
Встроенные интерфейсы	PROFIBUS, до 12 Мбит/с
Габариты (Ш×В×Г), мм	70×125×130

Вариант технической реализации МСАУ ТПОК представлен на рисунке 4.37.

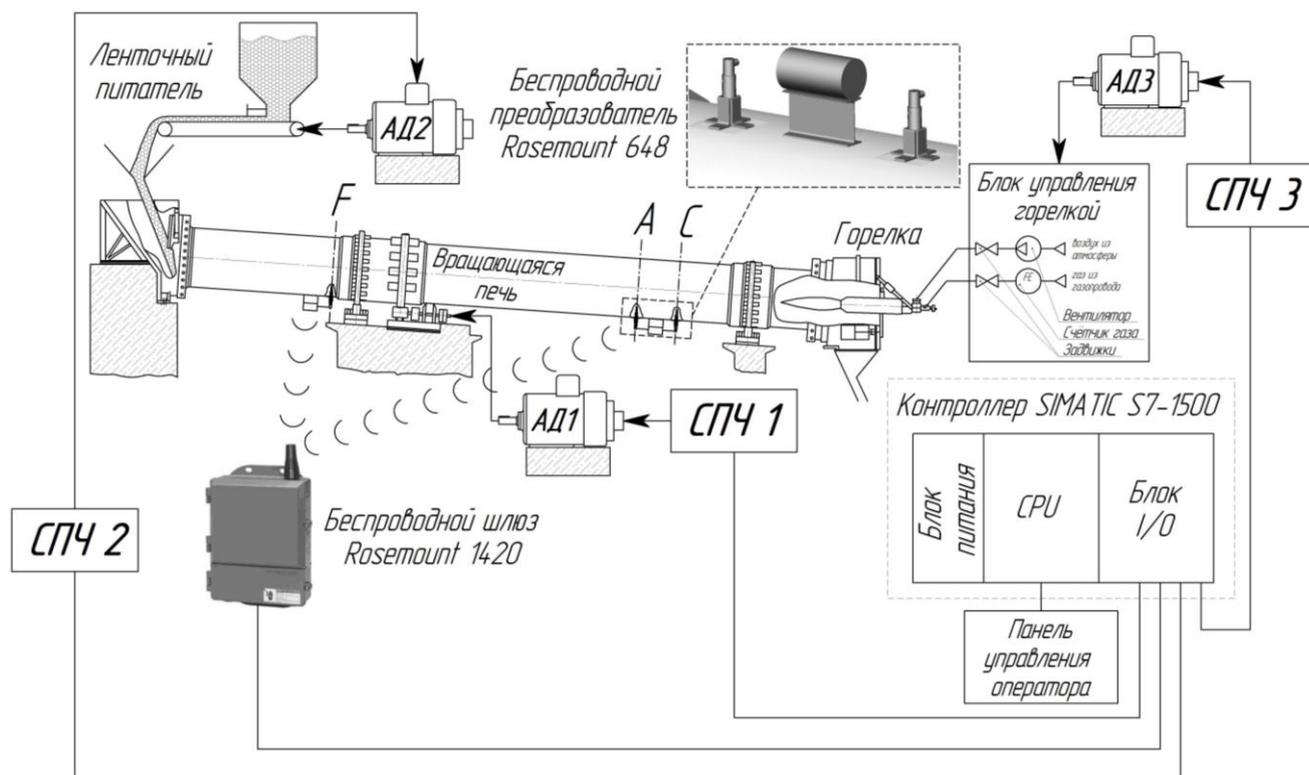


Рисунок 4.37 – Вариант технической реализации МСАУ ТПОК

#### 4.6 Технико-экономический расчёт

##### *Расчёт капитальных затрат на автоматизацию ТПОК*

В состав капитальных затрат проектируемой системы автоматизации  $K_{пр}$  включаются [145]:

- $K_{приоб}$  – затраты на приобретение КИП и А, (табл. 4.9), руб.;
- $K_{транс}$  – транспортные расходы, (принимаются в размере 3 % от суммы затрат на приобретение приборов и средств автоматизации (СА) по оптовым ценам, стоимости запасных частей, затрат на тару и упаковку), руб.;
- $K_{запч}$  – расходы на запасные части, (принимаются в размере 1 % от стоимости контрольно-измерительных приборов и СА), руб.;
- $K_{ту}$  – затраты на тару и упаковку, (принимаются в размере 2 % от стоимости приборов и СА по оптовым ценам), руб.;
- $K_{зс}$  – заготовительно-складские расходы, (принимаются в размере 5-10 % от стоимости приборов и СА по оптовым ценам), руб.;
- $K_{мп}$  – затраты на монтаж приборов и СА (принимаются в размере 15 % от стоимости приборов и СА), руб.;

Таблица 4.9 – Стоимость приборов и средств автоматизации

Наименование, марка приборов и средств автоматизации	Количество единиц	Цена за единицу, руб.	Общая стоимость, руб.
Simatic S7-1500 CPU 1518F-4 PN/DP	1	484908	484908
Карта памяти для CPU S7-1500	1	46479,94	46479,94
Блок питания нагрузки PM 1507	1	11152	11152
Системный блок питания PS 1507	1	31620	31620
Модуль PROFIBUS	1	62016	62016
Программное обеспечение STEP 7 Basic V13	1	143140	143140
Силовой преобразователь частоты Altivar ATV312 1.5 кВт 380-500 В (ATV312HU15N4B)	1	21371,93	21371,93
Беспроводной измерительный преобразователь температуры Rosemount 648	3	42544	127632

Наименование, марка приборов и средств автоматизации	Количество единиц	Цена за единицу, руб.	Общая стоимость, руб.
Беспроводной шлюз Rosemount 1420	1	345306	345306
Термоэлектрический преобразователь ТПП Rosemount 1075	6	10866	65196
Силовой преобразователь частоты Altivar 900 37 кВт 380 В IP55 (ATV950D37N4)	1	229229,98	229229,98
Задвижка ЗГП 100 фланцевая для газа с электроприводом	1	330395	330395
Силовой преобразователь частоты Altivar ATV312 0.55 кВт 380-500 В (ATV312H055N4B)	1	15303,53	15303,53
Итого	18	1774332	1913750

$$K_{\text{транс}} = K_{\text{приоб}} \cdot H_{\text{сз}}, \quad (4.1)$$

где  $H_{\text{сз}}$  – коэффициент, соответствующий проценту (%) от суммы затрат на приобретение приборов и средств автоматизации

$$K_{\text{транс}} = 1913750 \cdot 0,03 = 57412,5 \text{ руб.};$$

$$K_{\text{запч}} = K_{\text{приоб}} \cdot H_{\text{сз}}, \quad (4.2)$$

$$K_{\text{запч}} = 1913750 \cdot 0,01 = 19137,5 \text{ руб.};$$

$$K_{\text{ту}} = K_{\text{приоб}} \cdot H_{\text{сз}}, \quad (4.3)$$

$$K_{\text{ту}} = 1913750 \cdot 0,02 = 38275 \text{ руб.};$$

$$K_{\text{зс}} = K_{\text{приоб}} \cdot H_{\text{сз}}, \quad (4.4)$$

$$K_{\text{зс}} = 1913750 \cdot 0,1 = 191375 \text{ руб.};$$

$$K_{\text{мп}} = K_{\text{приоб}} \cdot H_{\text{сз}}, \quad (4.5)$$

$$K_{\text{мп}} = 1913750 \cdot 0,15 = 287062,5 \text{ руб.};$$

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{приоб}} + K_{\text{транс}} + K_{\text{запч}} + K_{\text{ту}} + K_{\text{зс}} + K_{\text{мп}}, \quad (4.6)$$

$$K_{\text{пр}} = 1913750 + 57412,5 + 19137,5 + 38275 + 191375 + 287062,5 = 2507012,5 \text{ руб.}$$

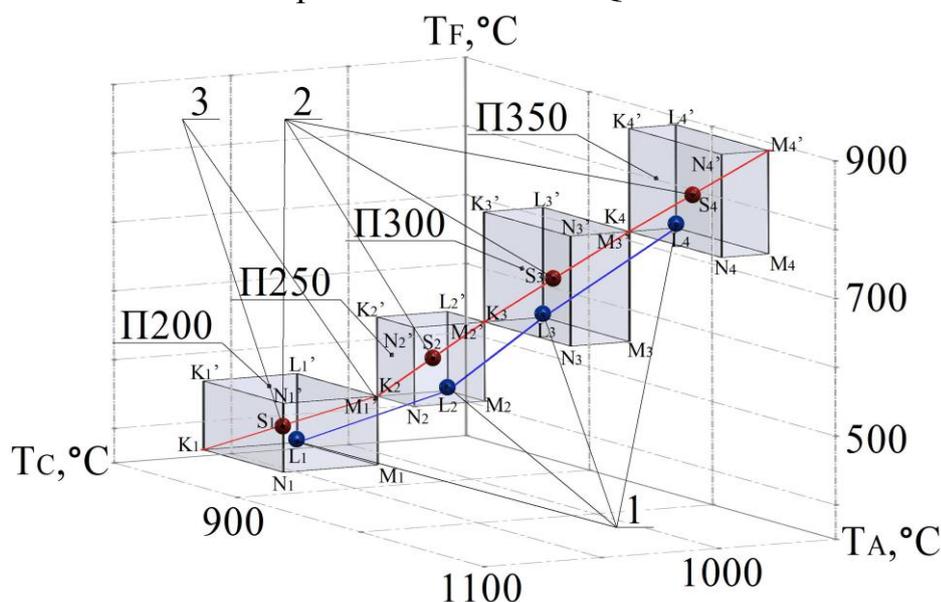
#### *Расчёт условно-годовой экономии от автоматизации ТПОК*

Показатель условно-годовой экономии используют для общей оценки значения мероприятия, для определения срока окупаемости затрат и его внедрения.

В главах 2 и 3 было установлено, что при получении определённой марки керамзита, прочность  $R$  выше, когда в сечении  $C$ , ниже температура  $T_C$  (меньше объёмная тепловая мощность  $Q_T$ ) (рис. 2.15 – 2.17, рис. 3.1), в сечении  $A$ , когда выше температура  $T_A$  (меньше загрузка  $q_3$ , быстрее прогрев), в сечении  $F$ , когда выше температура  $T_F$  (ниже скорость вращения  $\omega_n$ ), соответственно максимальная прочность  $R_{\max}$  будет в точке  $N_i'$ .

Без системы управления, на производстве, если управление осуществляется тремя воздействиями: скоростью вращения печи, загрузкой сырца и тепловой мощностью горелки, то во избежание ухода за границы температур требуемой марки, работают в центре параллелепипеда – в точках  $S_i$ , с возможным уходом в точки  $M_i'$  (рис. 4.38) (табл. 4.10). Но зачастую на производстве управление скоростью вращения печи не осуществляется, тогда рабочие точки  $S_i$  и  $M_i'$  ограничиваются положением точек  $S_1$  и  $M_1'$  (рис. 4.38 (3)). При этом с целью обеспечения наименьших энергозатрат нужно осуществлять производство керамзита требуемой марки по прочности сдвигаясь к нижнему значению  $R$  в пределах определённой марки, т.е. рабочая точка системы автоматического управления должна находиться в точке  $L_i$  рассматриваемых параллелепипедов (рис. 4.38 (1), табл. 4.10). В точке  $L_i$  экономия получается по сравнению:

- 1) с точкой  $L_i'$  из за большей скорости  $\omega_n$  вращения печи (соответственно больше производительность),
- 2) с точкой  $M_i$  из за большей загрузки  $q_3$  печи сырцом (соответственно больше производительность)
- 3) с точкой  $K_i$  меньшим расходом топлива  $Q_T$ .



- 1 – области  $L_1$ - $L_4$  при управлении тремя воздействиями МСАУ ТПОК;
- 2 – области  $S_1$ - $S_4$  при «ручном» управлении тремя воздействиями;
- 3 – области  $S_1$ - $M_1'$  при «ручном» управлении двумя воздействиями ( $\omega_n = 0,26$  рад/с)

Рисунок 4.38 – Рабочие области в пространстве  $OT_FT_AT_C$

Таблица 4.10 – Значения температур и управляющих воздействий для марок керамзита П200 – П350 по прочности

		$T_F, ^\circ\text{C}$	$T_A, ^\circ\text{C}$	$T_C, ^\circ\text{C}$	$\omega_p, \text{рад/с}$	$q_3, \text{т/ч}$	$G_r, \text{м}^3/\text{с}$	$V_r/V_k, \text{м}^3/\text{м}^3$	
П200	R = 4,5	Точка L	375	825	1035	0,23	12,15	0,1805	38,38
	R = 5	Точка S	425	857,5	1055	0,193	11,48	0,1865	41,45
	R = 5,5	Точка M'	475	890	1035	0,165	10,79	0,1805	43,26
П250	R = 5,5	Точка L	475	890	1005	0,165	10,79	0,1715	40,88
	R = 6	Точка S	532,5	905	1020	0,134	10,32	0,176	43,93
	R = 6,5	Точка M'	590	920	1005	0,12	9,84	0,1715	44,53
П300	R = 6,5	Точка L	590	920	980	0,12	9,84	0,164	43,94
	R = 7,25	Точка S	670	955	992,5	0,1036	8,75	0,1677	50,5
	R = 8	Точка M'	750	990	980	0,0927	7,64	0,164	56,51
П350	R = 8	Точка L	750	990	960	0,0927	7,64	0,158	53,68
	R = 9	Точка S	805	1027,5	970	0,086	6,08	0,161	65,56
	R = 10	Точка M'	900	1065	960	0,08	4,5	0,158	78,75

Одним из основных факторов определения эффективности производства керамзита, помимо производительности, является отношение объёмного расхода топлива (газа)  $V_r$  к объёму  $V_k$   $1\text{м}^3$  керамзита, поскольку в структуре себестоимости готового продукта на долю топлива приходится 16–27% [11]. Средневзвешенный расход газа на  $1\text{м}^3$  керамзита на заводах составляет 77,43 – 42,49  $\text{м}^3/\text{м}^3$  [11,22,146].

Проведём численное моделирование на синтезированной нами МСАУ ТПОК для оценки относительных затрат газа на обжиг  $1\text{м}^3$  керамзита. Целью моделирования является поочерёдный переход с производства одной марки по прочности на другую, т.е. переход между рабочими точками марок П200–П350, оптимальными  $L_i$  и неоптимальными  $S_i$  и  $M_i'$  точками (рис. 4.38) и сравнение соотношения затрат газа на обжиг  $1\text{м}^3$  керамзита  $V_r/V_k$ .

Для проведения моделирования и определения соотношения  $V_r/V_k$  построим структурную схему (рис. 4.39) (канал F не показан), где  $G_r$  – расход газа,  $V_r$  – объём газа,  $V_k$  – объём керамзита,  $\rho_c$  – плотность сырца керамзита ( $\rho_c = 1100 \text{ м}^3$ ),  $K_B$  – коэффициент вспучивания сырца керамзита ( $K_B = 1,5$ ).

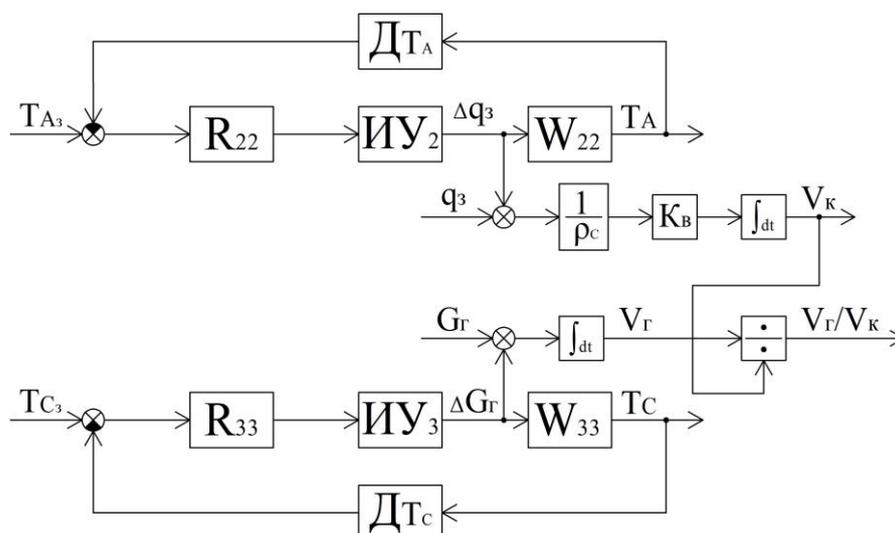


Рисунок 4.39 – Структурная схема МСАУ ТПОК для определения затрат газа на обжиг  $1\text{ м}^3$  керамзита

Для перехода между рабочими точками марок П200–П350 в каналах F, A и C МСАУ ТПОК задаются соответствующие приращения температур  $\Delta T_F$ ,  $\Delta T_A$ ,  $\Delta T_C$  (табл. 4.11), соответствующие приращениям  $\Delta\omega_p$ ,  $\Delta q_3$ ,  $\Delta Q_r$  ( $\Delta G_r$ ). В том случае когда управление осуществляется двумя воздействиями  $q_3$  и  $Q_r$ , без управления скоростью  $\omega_p$  вращения печи, температура  $T_F$  остаётся постоянной и изменяется лишь от действия перекрёстных связей максимум на  $24^\circ\text{C}$  и  $29^\circ\text{C}$  (суммарно  $53^\circ\text{C}$ ) от воздействия  $q_3$  и  $Q_r$  соответственно, рабочая точка находится в точке  $S_1$ , температура  $T_F = 428^\circ\text{C}$ , при этом прочность составляет максимум  $R = 5$  МПа (табл. 4.10, 4.11). Динамика изменения соотношений  $V_r/V_K$  при переходе с марки П200 на П250 представлена на рисунке 4.40.

Таблица 4.11 – Приращения температур  $\Delta T_F$ ,  $\Delta T_A$ ,  $\Delta T_C$  для марок П200 – П350

При трёх управляющих воздействиях								
		$\Delta T_F$ , $^\circ\text{C}$	$\Delta T_A$ , $^\circ\text{C}$	$\Delta T_C$ , $^\circ\text{C}$	$\Delta\omega_p$ , рад/с	$\Delta q_3$ , т/ч	$\Delta G_r$ , $\text{м}^3/\text{с}$	$\Delta V_r/V_K$ , $\text{м}^3/\text{м}^3$
П200–П250	Точка L	100	65	-30	0,065	1,36	-0,009	2,5
	Точка S	107,5	47,5	-35	0,059	1,16	-0,0105	2,48
	Точка M'	115	30	-30	0,065	0,95	-0,009	1,27
П250–П300	Точка L	115	30	-25	0,045	0,95	-0,0075	3,06
	Точка S	137,5	50	-27,5	0,03	1,57	-0,0083	6,57
	Точка M'	160	70	-25	0,045	2,2	-0,0075	11,98
П300–П350	Точка L	160	70	-20	0,0273	2,2	-0,006	9,74
	Точка S	135	72,5	-22,5	0,0176	2,67	-0,0067	15,06
	Точка M'	150	75	-20	0,0273	3,14	-0,006	22,24
При двух управляющих воздействиях								
П200–П250	Точка $S_1$	–	47,5	-35	0,059	1,16	-0,0105	2,48
	Точка $M_1'$	–	30	-30	0,065	0,95	-0,009	1,27

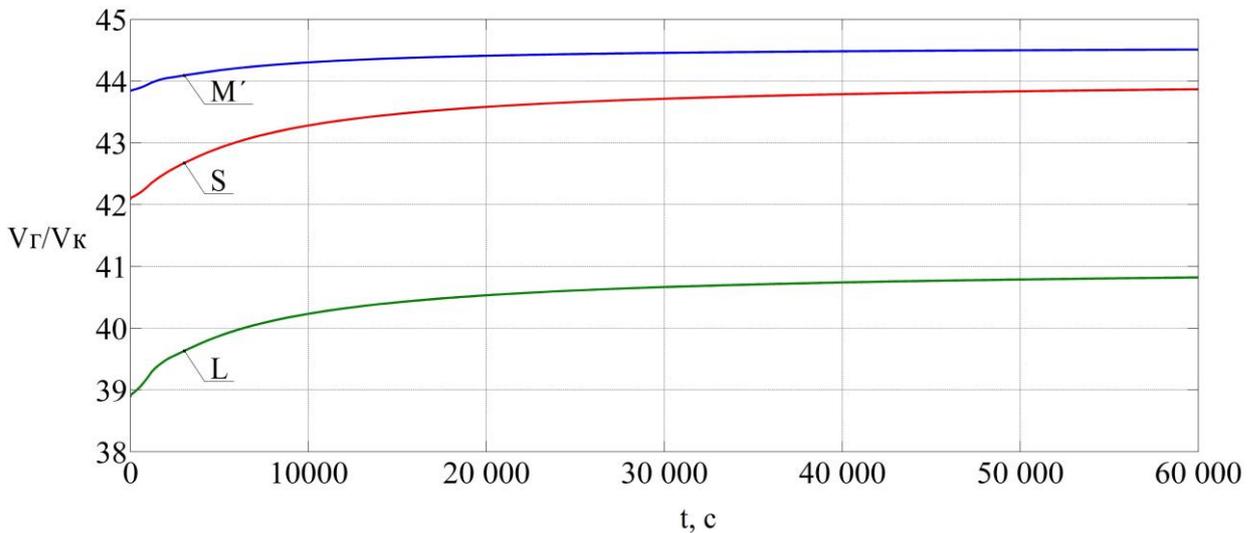


Рисунок 4.40 – Соотношение затрат газа на обжиг  $1\text{ м}^3$  керамзита для различных точек при переходе с марки П200 на П250

Сравнение полученных соотношений (рис. 4.40) затрат газа на обжиг  $1\text{ м}^3$  керамзита для точки  $L_1$   $V_{Г}/V_{к} = 40,88$ , для точек  $S_1$  и  $M_1'$   $V_{Г}/V_{к} = 43,93$  и для точек  $M_1'$   $V_{Г}/V_{к} = 44,53$  показывает эффективность системы управления и экономию газа 7–8,2% относительно точек  $S_1$  и  $M_1'$  соответственно. Для марок П300, П350, экономия в точке  $L_i$  составляет 16,7–32% по сравнению с токами  $S_i$  и  $M_i'$  при трёхмерном «ручном» управлении. При этом погрешность системы будет определяться точностью термопары, которая составляет  $\pm 1^\circ\text{C}$  и погрешностью преобразователя  $\pm 0,23^\circ\text{C}$ . В результате погрешность составит  $\pm 1,23^\circ\text{C}$ , что даст незначительную погрешность по прочности  $\Delta R = \pm 0,126\text{ МПа}$ . В свою очередь погрешность при «ручном» управлении, по показаниям пирометра, на производстве составит  $\pm 10,25 \div 17,75^\circ\text{C}$  и соответственно по прочности  $\Delta R = \pm 1,05 \div 1,82\text{ МПа}$ , что существенно и может привести к получению другой марки керамзита.

Изменения затрат газа на обжиг  $1\text{ м}^3$  керамзита  $V_{Г}/V_{к}$  при переходе между марками П200 – П350 представлены в таблицах 4.10, 4.11 и на рисунке 4.41, на их основе построены оптимальные с точки зрения экономии кривые обжига для получения марок керамзита П200 – П350 по прочности (рис. 4.42).

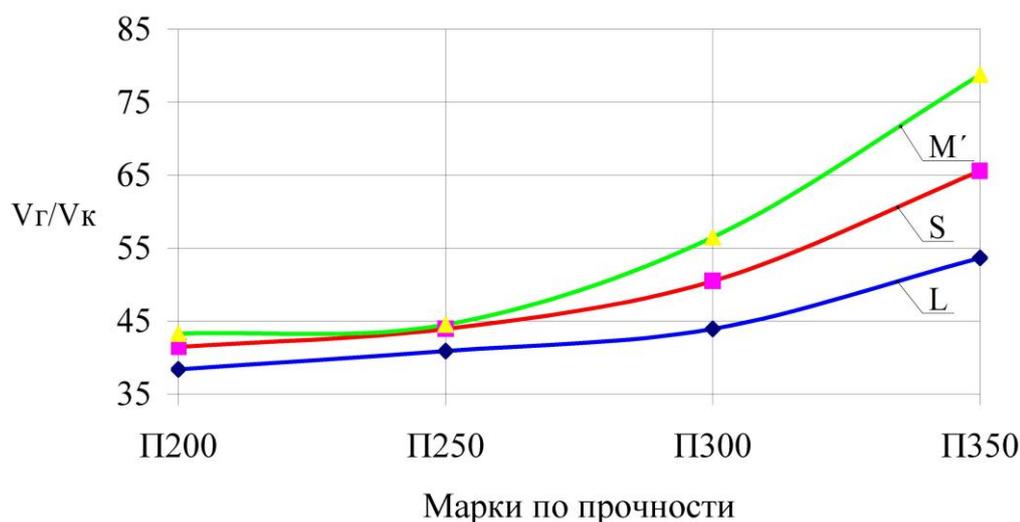


Рисунок 4.41 – Затраты газа на обжиг  $1\text{ м}^3$  керамзита для марок П250 – П350

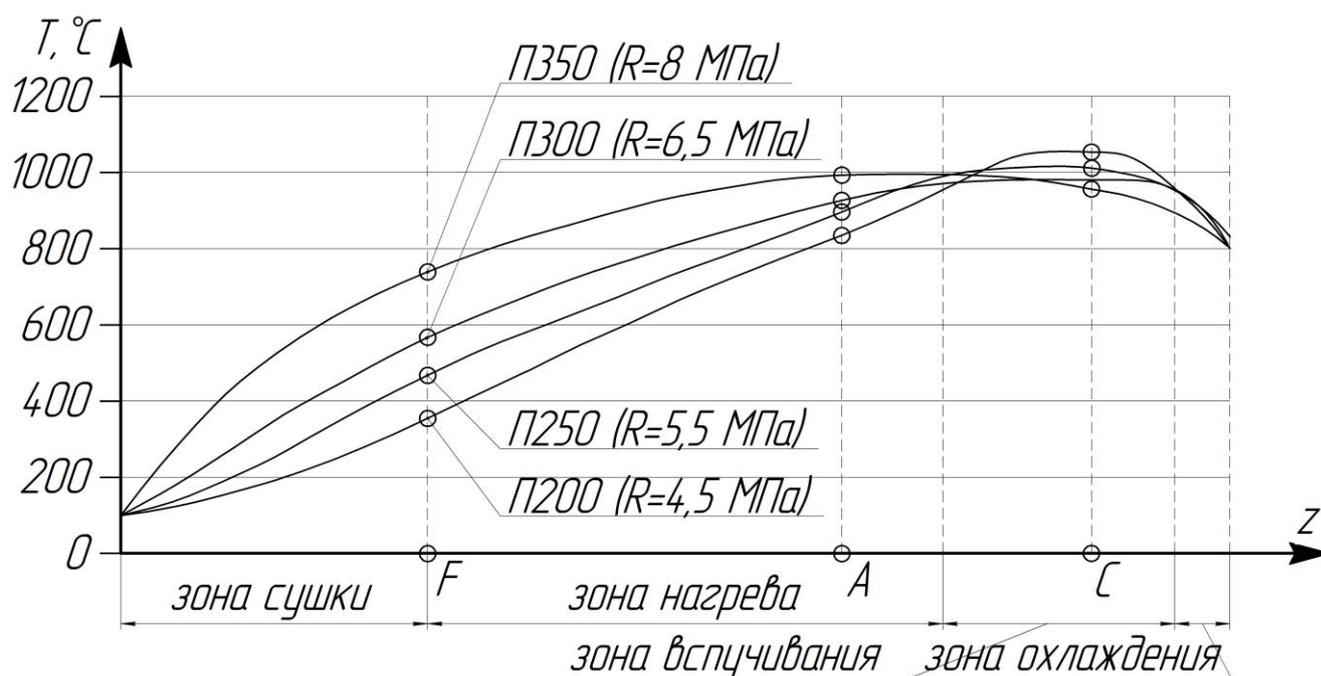


Рисунок 4.42 – Оптимальные кривые обжига для получения марок П250 – П350

После внедрения системы автоматического управления произойдут изменения в количестве требуемого газа на обжиг керамзита.

Экономия от сокращения расхода топлива, рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_T = (Q_{T(б)} - Q_{T(пр)}) \cdot П_б \cdot Ц_T ; \quad (4.7)$$

где  $\mathcal{E}_T$  – экономия от изменения расхода топлива (газа), руб.;

$Q_{T(б)}$ ,  $Q_{T(пр)}$  – расход газа на  $\text{м}^3$  керамзита в базовом и проектируемом варианте соответственно,  $\text{м}^3/\text{м}^3_{\text{кер}}$ ;

$П_б$  – производительность вращающейся печи для марок М800–М1000,  $50000\text{ м}^3/\text{год}$  [146];

$Ц_T$  – цена за  $1\text{ м}^3$  газа, руб.

Экономия от снижения расхода топлива составит:

$$\mathcal{E}_\Delta = (65 - 55) \cdot 50000 \cdot 3,855 = 1927500 \text{ руб.}$$

Изменения расходов на электроэнергию КИП и А:

$$\mathcal{E}_{\Delta(\text{КИПиА})} = N_{\text{пр}} \cdot T_{\text{пр}} \cdot \mathcal{C}_\Delta \quad (4.8)$$

где  $N_{\text{пр}}$  – суммарная мощность средств автоматизации в проектируемом варианте, кВт;

$T_{\text{пр}}$  – годовой фонд времени работы средств автоматизации в проектируемом варианте, час.;

$\mathcal{C}_\Delta$  - тариф за 1 кВт·ч электроэнергии, руб.

$$\mathcal{E}_{\Delta(\text{КИПиА})} = 2,1 \cdot 8040 \cdot 5 = 84420 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления и затраты на текущий ремонт и содержание оборудования:

$$\Delta A = H_a \cdot K_{\text{пр}}, \quad (4.9)$$

$$\Delta A = 0,15 \cdot 2507012,5 = 376051,88 \text{ руб.},$$

$$\Delta P = H_{\text{рем}} \cdot K_{\text{пр}}, \quad (4.10)$$

$$\Delta P = 0,05 \cdot 2507012,5 = 125350,63 \text{ руб.},$$

где  $H_a$ ,  $H_{\text{рем}}$  – коэффициент соответствующий проценту (%) норм отчислений на амортизацию и текущий ремонт, и содержание КИП и А;

$K_{\text{пр}}$  – капитальные вложения в проектируемый вариант автоматизации, руб.

Норма отчислений на текущий ремонт и содержание приборов и средств автоматизации составляет 3 – 5 %, норма амортизации – 15 %.

Таблица 4.12 – Сводные значения условно-годовой экономии

Статьи затрат на производство	Экономия, (Э), руб.	Дополнительный расход, (Др), руб.
Затраты на газ	1927500	-
Затраты на электроэнергию КИП и А	-	84420
Амортизационные отчисления	-	376051,88
Текущий ремонт и содержание оборудования	-	125350,63
ИТОГО:	1927500	585822,5

Условно-годовая экономия определяется как разность между суммой статей экономии и дополнительного расхода.

$$\mathcal{E}_{\text{у.г.}} = \Sigma \mathcal{E} - \Sigma \text{Др} \quad (4.11)$$

$$\mathcal{E}_{\text{у.г.}} = 1927500 - 585822,5 = 1341677,5 \text{ руб.}$$

*Расчёт экономического эффекта, коэффициента эффективности и срока окупаемости капитальных затрат*

*Годовой экономический эффект* от автоматизации производственных процессов или модернизации систем автоматизации, определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \Delta \text{П} - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{пр}}, \quad (4.12)$$

где  $K_{\text{пр}}$  – капитальные затраты в проектируемом варианте автоматизации, руб.;

$\Delta \text{П}$  – прирост прибыли, вызванный внедрением средств автоматизации (включает в себя условно-годовую экономию), руб.;  $E_{\text{н}}$  – нормативный коэффициент эффективности

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 1341677,5 - 1 \cdot 2507012,5 = - 1165335 \text{ руб.}$$

*Срок окупаемости капитальных вложений* на автоматизацию,  $T_{\text{ок}}$ , показывающий время, в течение которого капитальные вложения окупят себя за счёт дополнительной прибыли или экономии от снижения себестоимости:

$$T_{\text{ок}} = K_{\text{пр}} / \Delta \text{П}, \quad (4.13)$$

где  $\Delta \text{П}$  – прирост прибыли, вызванный внедрением средств автоматизации, (включает в себя условно-годовую экономию и прибыль от повышения качества продукции), руб.;

$K_{\text{пр}}$  – капитальные вложения на КИП и А в проектируемом варианте, руб.

$$T_{\text{ок}} = 2507012,5 / 1341677,5 = 1,87 \text{ года}$$

*Коэффициент экономической эффективности* ( $K_{\text{эф}}$ ), показывающий, какая экономия будет получена после автоматизации на каждый рубль капитальных вложений на автоматизацию, рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{эф}} = \Delta \text{П} / K_{\text{пр}}, \quad (4.14)$$

$$K_{\text{эф}} = 1341677,5 / 2507012,5 = 0,46$$

Сравним рассчитанные срок окупаемости и коэффициент экономической эффективности с нормативными величинами:

$$T_{OK(расч)} \leq T_{OK(норм)};$$

$$1,87 < 2$$

$$K_{ЭФ} \geq E_n,$$

$$0,46 > 0,35,$$

необходимые условия выполняются, следовательно, капитальные вложения экономически эффективны.

Таблица 4.13 – Результаты расчётов экономической эффективности

Наименование показателей	Единицы измерения	Наименование варианта	
		базовый	проектируемый
1	2	3	4
1. Выпуск керамзита в год	м <sup>3</sup>	50000	50000
2. Капитальные вложения	руб.	–	2507012,5
3. Изменение расхода газа в год	руб.	3250000	2750000
4. Изменение расхода электроэнергии в год	руб.	–	84420
5. Годовой экономический эффект	руб.	–	- 1165335
6. Срок окупаемости капитальных вложений	год	–	1,87

Поскольку величина годового экономического эффекта получилась положительной 1341677,5, а срок окупаемости капитальных вложений составил 1,87 года и не превышает, установленную норму в 2 года для автоматизация отдельных процессов и операций, установки приборов и приспособлений на действующем оборудовании, считаем целесообразным проведение мероприятий по внедрению средств автоматизации в технологический процесс производства керамзита. Также система автоматизации даёт неколичественную экономическую эффективность в виде улучшение условий труда обжигальщика и повышение культуры производства.

### **Выводы по четвёртой главе**

1. В программной среде MATLAB создана вычислительная модель объекта управления с сосредоточенными параметрами в виде передаточных функций, которыми описываются переходные процессы, протекающие во вращающейся печи, смоделированные в программной среде SolidWorks на вычислительной 3D модели с распределёнными параметрами. По результатам исследований объекта управления разработаны модели собственных каналов и перекрестных связей многомерной структуры объекта. Построена в MATLAB вычислительная модель многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита, проведено численное моделирование.

2. Предложен вариант технической реализации многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита, в которой измерение температуры керамзита осуществляется термопарами в трёх сечениях, обратная связь замыкается посредством беспроводного преобразователя через радиоканал, далее сигнал с приёмного шлюза поступает на промышленный контроллер, в котором на основе заданных параметров и алгоритма работы, посредством силовых преобразователей частоты осуществляется согласованное управление тремя электроприводами, вращающейся печи, ленточного питателя и газовой горелки соответственно.

3. Разработана методика инженерного проектирования многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита, которая позволяет управлять сложным объектом с распределёнными параметрами тремя управляющими воздействиями в характерных опорных сечениях. Методика основана на применении разработанного алгоритма согласованного управления, объёмной тепловой мощностью горелки, загрузкой печи сырцом и приводом вращения печи тремя каналами. Разработаны методики для проведения численного моделирования по исследованию динамических характеристик технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи как объекта управления с тремя управляющими воздействиями и системы управления ТПОК. Они базируются на моделировании вращающейся печи как объекта управления с

распределёнными параметрами в программной среде SolidWorks, с получением статических и динамических характеристик, с последующим их описанием передаточными функциями в MATLAB и проведением численного моделирования.

4. Установлено, что предложенная структура МСАУ ТПОК, за счёт согласованного управления электроприводами горелки, загрузки и скорости вращения печи, позволяет осуществлять производство керамзита с регулируемой величиной прочности, с погрешностью  $\pm 0,126$  МПа, что не превышает 5% и сократит величину условного брака в виде керамзита не той марки, относительно требуемой. Проведён технико-экономический расчёт внедрения МСАУ ТПОК, показывающий, что данная система позволит сократить расход газа в среднем на 8% на производство  $1\text{ м}^3$  керамзита, срок окупаемости капитальных вложений составил 1,87 года.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи как объекта управления с распределёнными параметрами, под которым понимается совокупность теплофизических процессов, протекающих при обжиге керамзита, и электромеханических процессов в исполнительных электроприводах вращающейся печи, ленточного питателя и горелки. Состояние объекта управления определяется вектором выходных координат  $\bar{X} = [T_F, T_A, T_C]^T$ , где  $T_F, T_A, T_C$  температура в сечениях F, A и C по оси печи соответственно, который в рамках известных допущений определяет кривую обжига и прочность производимого керамзита. Предложена методика выбора координат сечений F, A и C на основании конструктивных параметров печи и технологических параметров обжига. Элементами вектора управляющих воздействий –  $\bar{U} = [\omega_p, q_3, Q_r]^T$  приняты: скорость  $\omega_p$  вращения печи; величина загрузки  $q_3$  сырца керамзита, подаваемого в печь (определяется скоростью ленточного питателя), тепловая мощность горелки  $Q_r$  (величина которой регулируется приводами устройства управления подачей газа в горелку). Основное возмущение – влажность  $w$  сырца керамзита.

При моделировании объекта управления принят ряд обоснованных допущений и разработана расчётная схема вращающейся печи в виде трёхслойного цилиндра. Разработана система уравнений динамики объекта. Сформированы начальные и граничные условия.

Выполнено численное решение уравнений в программной среде SolidWorks применительно к печи 2,5×40м, в которой осуществляется обжиг глины бескудниковского месторождения. Получен массив данных температурного поля керамзита отражающий динамику тепловых процессов «в большом» и «в малом». Аппроксимация переходных характеристик «в малом» для сечений F, A и C из полученного массива поля передаточными функциями позволила выполнить переход от модели с распределёнными параметрами к многомерной модели объекта с сосредоточенными параметрами. Такой подход ориентирован на практическую реализацию САУ обжигом керамзита тремя управляющими воздействиями.

Синтезирована структура вращающейся печи в виде многомерной модели с сосредоточенными параметрами, где выходными координатами является температура в трёх характерных сечениях печи F, A и C. Эта модель ориентирована на синтез многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита по заданным значениям прочности R. Определены математические модели операторов многомерного объекта управления в форме передаточных функций. Показано, что по отношению к скорости  $\omega_n$  они представляют собой апериодические звенья с нестационарными значениями постоянной времени ( $T_{11} = 290 \div 550$ с), и коэффициента передачи  $K_{11} = (1,25 \div 5,3)10^3 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{рад}/\text{с})$ . Остальные операторы многомерного объекта описаны последовательным соединением апериодического звена и звена запаздывания. Параметры звеньев операторов по отношению к объёмной мощности  $Q_r$  стационарны ( $T_{33} = 300$ с,  $\tau_{33} = 150$ с,  $K_{33} = 32 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{Вт}/\text{м}^3)$ ), а операторов по отношению к загрузке  $q_3$  – нестационарны ( $\tau_{22} = 1215 \div 2600$ с,  $K_{22} = 24 \div 48 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{т}/\text{ч})$ ,  $T_{22} = 165$ с). Показано, что модель адекватно описывает изменение температур во вращающейся печи, по отношению к управляющим воздействиям: мощность горелки  $Q_r$ , загрузка сырца керамзита  $q_3$ , скорость вращения печи  $\omega_n$  и возмущению – влажность сырца  $w$ . Величина среднеквадратичного отклонения, не превысила 5%.

2. Разработаны требования к многомерной системе автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита, заключающиеся в поддержании температуры в опорных сечениях F, A и C с отклонением  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Установлена связь прочности R в трёхмерном пространстве с координатами  $T_F$ ,  $T_A$ ,  $T_C$ . Введено понятие температурно-прочностной характеристики, такой подход позволяет формировать вектор задающих воздействий для САУ обжигом керамзита  $\bar{X}_3 = [T_{Fi}, T_{Ai}, T_{Ci}]^T$ .

3. Осуществлён структурный синтез многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита (МСАУ ТПОК) за счёт автоматического согласованного управления скоростью  $\omega_n$ , загрузкой  $q_3$  и объёмной тепловой мощностью  $Q_r$ . Выполнены настройки регуляторов отдельных каналов по критерию обеспечения робастности, в условиях нестационарности параметров объекта управления. Каналы F, A и C синтезированы в виде многоконтурной системы с одной измеряемой координатой (МСОИК), при этом с целью упрощения технической реализации цифрового

регулятора все каналы состоят из двух контуров. Каналы А и С содержат звенья запаздывания, поэтому, с использованием основных подходов синтеза МСОИК, произведена настройка регуляторов этих систем, численным методом с использованием частотных характеристик в программной среде MATLAB.

Оценено влияние межканальных связей на динамику САУ, показано, что их влияние оказывает положительный эффект при управлении процессом обжига керамзита. Показано, что синтезированная МСАУ ТПОК обладает свойством робастности в условиях параметрической неопределенности объекта управления.

4. Разработана методика для численного математического моделирования динамических характеристик технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи как объекта управления с тремя управляющими воздействиями и системы управления ТПОК. Разработана методика инженерного проектирования многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита заданной прочности (МСАУ ТПОК), которая обеспечивает требуемые показатели качества, технической особенностью, которой является применение беспроводной связи для передачи параметров с датчиков температуры, установленных на вращающейся печи.

5. Установлено, что предложенная МСАУ ТПОК, за счёт согласованного управления электроприводами вращения печи, ленточного питателя и горелки, позволяет осуществлять производство керамзита с регулируемой величиной прочности, с погрешностью  $\pm 0,126$  МПа, что не превышает 5% от заданного значения прочности. Проведён технико-экономический расчёт внедрения МСАУ ТПОК, показывающий, что практическое внедрение системы позволит сократить расход газа на 8% при производстве  $1\text{ м}^3$  керамзита, срок окупаемости капитальных вложений – 1,87 года.

Результаты работы используются в практике инженерного проектирования на ООО «Керамуз» (г. Самара) при разработке рекомендаций по повышению эффективности управления обжиговым оборудованием цехов по производству керамзита, в частности, рекомендаций по повышению прочности керамзита, а также в учебном процессе Самарского государственного технического университета при подготовке по направлению «Строительство» бакалавров профиль «Механизация и автоматизация строительства» и магистров по профилю «Комплексная механизация строительства».

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Онацкий, С.П. Производство керамзита. – 3-е изд., перераб. и доп. / С.П. Онацкий – М.: Стройиздат, 1987. – 333 с., ил.
2. Горин В.М., Токарева С.А., Кабанова М.К. Высокопрочный керамзит и керамдор для несущих конструкций и дорожного строительства. // Строительные материалы №1 (661) январь 2010г. ЗАО «Сорм» Москва 2010 С.9-11.
3. Исаев В.Ф. и др. Керамзитобетон в мостостроении. Тезисы докладов 111 Всесоюзной конференции по легким бетонам. М.: Стройиздат. 1985. С. 146—147.
4. Персиянов А.Н. Производство и применение керамзита. Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1961. – 46 с., ил.
5. Перегудов, В.В. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей: учебник для ВУЗов. / В.В. Перегудов, М.И. Роговой – М.: Стройиздат, 1983. – 416с., ил.
6. Фадеев А.С. Автоматизация технологического процесса вспучивания керамзита во вращающейся печи. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Самара, 2011 – 137с.
7. Шубин М.В. Автоматическая система упреждения аварий (разрушения огнеупорной футеровки) мощных вращающихся печей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2010 – 28с.
8. Торгунаков В.Г. Тепловой неразрушающий контроль вращающихся обжиговых печей. Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук. Томск, 2006 – 42с., ил.
9. Макаров Б.Н. Моделирование и управление процессами теплообмена при обжиге керамзита в противоточных барабанных агрегатах. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. Иваново, 2005 – 102с.

10. Фадеев А.С., Галицков С.Я., Данилушкин А.И. Моделирование вспучивания керамзита во вращающейся печи как объекта управления // Вестник Самарского государственного технического университета, Серия «Технические науки», №2 (30) СамГТУ. - Самара, 2011. - С.160-168.

11. Разработка и осуществление мер по дальнейшему сокращению расхода топлива при производстве лёгких заполнителей: отчет о НИР / СПКБ НИИКерамзита; рук. Петров В.П.; исполн.: Скиба Б.В.– Куйбышев, 1984. – 109 с.

12. Комисаренко Б.С., Чикноворьян А.Г., Сафронова Г.В., Горлов А.И., Бурцев А.Н. Проектирование предприятий стройиндустрии. Предприятия сборного бетона и железобетона: Учебное пособие. / Под ред. Б.С. Комисаренко. - Самара. Самара, 1999. 814с.

13. Комисаренко Б.С., Чикноворьян А.Г. Керамзит и керамзитобетон. Учебное пособие для ВУЗов / Под ред. Б.С. Комисаренко. – М.: Изд-во АСВ, 1993. 284с.

14. Ратновский В.Я. Автоматизация обжига керамзита во вращающихся печах. «Керамзит и керамзитобетон», вып. 1. НИИКерамзит, Куйбышев, 1966.

15. Горин В.М., Токарева С.А., Вытчиков Ю.С., Беляков И.Г., Шиянов Л.П. Применение стеновых камней из беспесчанного керамзитобетона в жилищном строительстве // Строительные материалы №2 (662) февраль 2010г. ЗАО «Сорм» Москва 2010 С.15-18

16. Структурный синтез системы управления вспучиванием керамзита во вращающейся печи / С.Я. Галицков, А.С. Фадеев // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1; URL: HYPERLINK "<http://www.science-education.ru/101-5627>" www.science-education.ru/101-5627

17. Галицков С.Я., Фадеев А.С. Оценка снижения энергозатрат на производство керамзита при использовании алгоритма согласованного управления печью // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура: научно-технический журнал/СГАСУ. – Самара, 2013. –Вып. №4 (12). – С 95–98.

18. Gronman R. Light Aggregate production drovie in Denmark, Rock Produkte, 1976, 79, Sentember, N 9.

19. Gorman P. Technical note-lightweight aggregate in western Europe. — International J. of lightweight Concrete, 1980, vol. 2, N 4, p. 211—219.

20. Система автоматического управления расходом топлива во вращающейся печи для обжига керамзитового гравия – Куйбышев: Государственный научно-исследовательский институт по керамзиту НИИКерамзит, 1981 – 70с.

21. Горелка газовая с регулируемой геометрией факела для обжиговой печи по производству керамзита. Руководство по эксплуатации. – Самара: ЗАО «НИИКерамзит», 2006. – 18с.

22. Отдельное технологическое оборудование для производства керамзита // strommash.ru / URL: <http://www.strommash.ru/catalog/otdelnoe-tehnologicheskoe-oborudovanie-dlya-proizvodstva-keramzita> (дата обращения: 2.05.2018).

23. Ходоров Е.И. Движение материала во вращающихся печах. - М.: Промстройиздат, 1957. - 64 с.

24. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология. Книга 1. М.: Теплотехник 2004. 688 с.

25. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология. Книга 2. М.: Теплотехник 2004. 592 с.

26. Белов М.П., Новиков А.Д., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов /Учебник для высших учебных заведений. — 3-е изд. — М.: Академия, 2007. — 576 с.

27. А.Г. Бутковский Методы управления распределёнными системами: Монография, М.: Наука, 1975

28. А.Г. Бутковский Структурная теория распределённых систем: Монография, М.: Наука, 1977

29. Рапопорт, Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределёнными параметрами: Учеб.пособие / Э.Я. Рапопорт. – М.: Высш.шк., 2005. – 296 с.

30. Рапопорт, Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами: Учеб.пособие / Э.Я. Рапопорт. – М.: Высш.шк., 2009 – 296 с.
31. Рапопорт Э.Я. Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. Куйбышев: КПТИ, 1985. – 56 с.
32. Рапопорт, Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем с распределенными параметрами: Учеб.пособие / Э.Я. Рапопорт. – М.: Высш.шк., 2003. – 299с.
33. Галицков С.Я., Самохвалов О.В., Фадеев А.С. Структурный синтез многомерной системы автоматического управления обжигом керамзита во вращающейся печи // Научное обозрение, №12 - Москва, 2013. – С. 204 – 208.
34. Галицков С.Я., Галицков К.С., Самохвалов О.В., Фадеев А.С. Моделирование обжига керамзита в печи с регулируемой скоростью вращения как объекта управления // Научное обозрение, №7 – Москва, 2015. – С. 227 – 237
35. Галицков С.Я., Самохвалов О.В. Методика моделирования системы автоматического управления температурой керамзита в конце зоны сушки // Научное обозрение, №14 – Москва, 2015. – С. 203 – 207
36. Галицков К.С., Самохвалов О.В. Отображение прочностных характеристик керамзита в пространстве температурных режимов трёх опорных сечений печи // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 91 – 94
37. Galitskov S.Ya., Fadeev A.S., Samohvalov O.V. Defining limit values of temperature field in typical sections of a rotary kiln producing expanded clay at a given density // Procedia Engineering, XXIV R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (24RSP), TFoCE 2015, ISSN: 18777058, – Vol. 111, – 2015, – pp. 233 – 235., <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.082>.
38. Galitskov S.Ya., Galitskov K.S., Samokhvalov O.V. Modelling Operating Area of Condition and Management of High Strength Bloating Clay, Stoving in a Rotary Kiln // Procedia Engineering, XXV P-R-S Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (25PRS), TFoCE 2016, ISSN: 18777058, – Vol. 153, – 2016, – pp. 609 – 612., <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.204>.

39. Galitskov S.Ya., Galitskov K.S., Samokhvalov O.V., Fadeev A.S. Optimal control of ceramsite burning in a rotary kiln // MATEC Web Conferences, 5th International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education”, – Vol. 86, – 2016, Pages 1 – 5, <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20168604009>

40. Galitskov K.S., Samokhvalov O.V., Fadeev A.S. Optimization of burning production process of ceramsite with specified density // Environment. Technology. Resources, Volume 3 – Rezekne, 2017, Pages 57 – 61, <http://dx.doi.org/10.17770/etr2017vol3.2569>

41. Галицков К.С., Галицков С.Я., Самохвалов О.В. Исследования динамики многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита // Вестник Самарского государственного технического университета, Серия «Технические науки», №2 (58) СамГТУ. - Самара, 2018. – С. 7 – 15

42. ГОСТ 32496-2013 Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия

43. Самохвалов О.В., Галицков С.Я., Фадеев А.С. Анализ технологических ограничений для получения прочного керамзита // ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2014: Материалы Международной научно-технической конференции, 9-11 сентября 2014 г., Самара / Самарск. гос. арх.-строит. ун-т. - Самара, 2014. – С. 156 –159.

44. Онацкий, С.П. Выбор и оценка глинистого сырья для производства керамзита. / С.П. Онацкий – М.: Государственное издательство литературы по строительным материалам, 1957. – 20с.

45. ГОСТ 25820-2014 Бетоны легкие. Технические условия

46. ГОСТ 32026-2012 Сырьё глинистое для производства керамзитовых гравия, щебня и песка. Технические условия

47. Галицков С.Я, Самохвалов О.В. Условия управления вращающейся печью, осуществляющей производство керамзита с заданной прочностью // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: материалы 71-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2013 года / СГАСУ. – Самара, 2014. С. 1009 – 1011

48. Самохвалов О.В. Алгоритм цифрового задающего устройства многомерной САУ обжигом керамзита с требуемыми показателями качества // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: материалы 18-й Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых/ МАДИ. – Москва, 2014. С. 199 – 200

49. Прокопец В.С., Галдина В.Д., Подрез Г.А. Асфальтобетоны на основе пористых заполнителей Западной и Восточной Сибири //Строит, материалы. 2009. № 11. С. 26-28.

50. Кондращенко В. И., Ярмаковский ВН., Гузенко СВ. О применении конструкционных легких бетонов в мостостроении. // Транспортное строительство. 2007. №9. С. 10-13.

51. Житкевич Р.К., Кац К.М. Высокопрочный легкий бетон. Всесоюзный семинар «Эффективные конструкции из легких бетонов» // Тезисы докладов. Госстрой СССР, М., 1980. С. 73-75.

52. Бужевич Г.А., Горчаков Г.И. Долговечность легких бетонов на пористых заполнителях. Всесоюзная конференция по легким бетонам // Тезисы докладов. Гостройиздат, М.: 1970. С. 61-73.

53. Деллос К.П. Несущие специальные конструкции из легких бетонов. Всесоюзный семинар «Эффективные конструкции из легких бетонов» // Тезисы докладов. Госстрой СССР, М.: 1980. С. 100-103.

54. Брейдо И.В., Сагитов П.И., Фешин Б.Н. Классификационные признаки систем управления электротехническими комплексами и системами / КарГТУ // Труды университета.– 2002.– № 1.– С. 55–57

55. Мальгин Г.В. Электротехнические комплексы с дискретными элементами и методы их моделирования и исследования // Вестник югорского государственного университета. – 2009. № 2 (13)

56. Федорашко И.Н. Дистанционное управление электротехническими комплексами / Вестник КузГТУ // – 2006, Выпуск 5, с. 47-50.

57. Технология заполнителей бетона: Учеб. для строит. вузов по спец. «Производство строительных изделий и конструкций» / С. М. Ицкович, Л. Д. Чумаков, Ю. М. Баженов. – М.: Высш. шк., 1991. – 272.: ил.

58. Юдин Д.А. Автоматизированная система управления вращающимися печами с применением технического зрения. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Белгород, 2014 – 203с.

59. Патент на изобретение №2554964, Способ обжига керамзита во вращающейся печи и устройство для его осуществления. Галицков С.Я., Самохвалов О.В., Фадеев А.С. // БИ. – 2015. –№19

60. Самохвалов О.В., Фадеев А.С. Математическое моделирование измерителя температуры материала во вращающейся печи // Труды 11-й Всероссийской межвузовской научно-практической конференции “Компьютерные технологии в науке практике и образовании”. – Самара: СамГТУ, 2012. – С.143 – 144

61. Самохвалов О.В., Фадеев А.С. Алгоритм цифрового наблюдателя автоматического устройства обжига керамзита // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: материалы 70-й юбилейной Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2012 года / СГАСУ. – Самара, 2013. – Ч. 2; С. 462 – 463.

62. Галицков С.Я., Фадеев А.С. Математическое описание сжигания газа во вращающейся печи для обжига керамзита // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика: материалы 64-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР университета за 2006г. - Самара, 2007 – 564с.

63. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - 5-е изд., перераб. и доп. - М.: “Наука”, 1974. - 712 с., ил.

64. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: - 7 -е изд., испр. - М.: “Дрофа”, 2003. - 840 с., ил.

65. Романенко П.Н. Гидродинамика и теплообмен в пограничном слое (Справочник). М., “Энергия” 1974.- 464 с.

66. Баутин С.П., Обухов А.Г. Полная система уравнений Навье-Стокса в цилиндрической системе координат / Тюмень : ТИУ, 2016. – 54 с.

67. Хворенков Д.А., Варфоломеева О.И. Методика расчета температурно-влажностных режимов работы дымовых труб теплоэнергетических установок // Промышленная энергетика, №7 – Москва, 2013. – С.30-33.
68. Араманович И.Г., Левин В.И. Уравнения математической физики - М.: “Наука”, 1969. – 288 с.
69. Брук А,Д. Дымососы газоочистных сооружений - М.: Машиностроение, 1984. - 144 с.
70. Галицков, С.Я. Динамика асинхронного двигателя / С.Я. Галицков, К.С. Галицков, А.П. Масляницын. – Самара: СГАСУ, 2004. – 97 с.
71. Галицков С.Я, Галицков К.С., Масляницын А.П. Математическое моделирование промышленных объектов управления. Самара: СГАСУ, 2004 – 152 с.
72. Строительные машины: Справочник: В 2 т. Т. 2: Оборудование для производства строительных материалов и изделий. Под общ. ред. Горбовца М.Н., 3-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1991. – 496 с., ил.
73. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления: Учебник для вузов. – 2-е изд., пререраб. и доп. – СПб.: Политехника, 2001. – 302 с.
74. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления: Учеб.пособ. – Наука. гл.ред.физ.-мат.лит., 1986. – 616с.
75. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода: Учеб. пособие для вузов. — М.: Энергия, 1979. — 616 с.: ил.
76. Борцов Ю.А., Соколовский Г Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.
77. Галицков С.Я., Галицков К.С. Структурное моделирование трехмассовой механической системы привода // Окружающая среда для нас и будущих поколений: материалы XIII международной конференции / отв. ред. С.В. Леванова. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 162 с.
78. Приводная техника: каталог <https://www.ktr.com/ru/katalogi/katalogi-i-broshjury/>
79. Галицков С.Я. Динамика электромеханических исполнительных систем прецизионных станков и роботов: Учебное пособие / Куйбыш. политехи, ин-т. Куйбышев, 1989. 108 с.

80. ГОСТ Р 51383-2012 «Горелки газовые автоматические с принудительной подачей воздуха. Технические требования безопасности и методы испытаний»

81. ПБ 12-529-03 «Правила безопасности систем газораспределения и газопотребления»

82. Лощинская А.В., Рысс С.М., Львович И.В. Автоматическое регулирование процессов обжига и сушки в промышленности строительных материалов. Ленинград – 1969. – 200с.

83. Галицков К.С., Самохвалов О.В. Выбор элементов вектора задающих сигналов многомерной САУ обжигом керамзита с заданной прочностью // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сборник статей [Электронный ресурс] / СГАСУ. Самара, 2016. С. 461 – 465

84. Алямовский А.А. SolidWorks 2007/2008 Компьютерное моделирование в инженерной практике. Санкт-Петербург 2008 – 1040 с.: ил.

85. Галицков С.Я., Самохвалов О.В., Фадеев А.С., Данилушкин А.И. Методика выполнения вычислительных экспериментов по исследованию динамики вспучивания керамзита в вращающейся печи // Труды 10-й Всероссийской межвузовской научно-практической конференции “Компьютерные технологии в науке практике и образовании”. – Самара: СамГТУ, 2011. – С. 134 – 136

86. Самохвалов О.В. К задаче автоматизации производства керамзита высокой прочности // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре, материалы 69-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2011 года. / Самарск. гос. арх.-строит. ун-т. – Самара, 2012.. – Ч. 2; С. 468 – 469

87. Самохвалов О.В., Галицков С.Я., Пышкин А.С., Фадеев А.С. О влиянии тепловой мощности и длины факела на прочностные и весовые характеристики керамзита // ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2014: Материалы Международной научно-технической конференции, 9-11 сентября 2014 г., Самара / Самарск. гос. арх.-строит. ун-т. - Самара, 2014. – С. 101 – 104

88. Самохвалов О.В. Структурный синтез объекта управления вращающейся печи для производства керамзита // Тезисы докладов XXXVI Самарской областной студенческой научной конференции. Посвящается 90-летию В.П. Лукачёва/ СГАСУ – Самара, 2010. – С. 304

89. Галицков С.Я., Самохвалов О.В., Данилушкин А.И. Моделирование влияния скорости вращения печи на кривую обжига керамзита // Труды 11-й Всероссийской межвузовской научно-практической конференции “Компьютерные технологии в науке практике и образовании”. – Самара: СамГТУ, 2012. – С.174 – 175

90. Галицков С.Я., Пышкин А.С., Самохвалов О.В., Данилушкин А.И. Исследование влияния геометрии факела на положение зоны вспучивания керамзита // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре, материалы 69-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2011 года./ Самарск. гос. арх.-строит. ун-т. – Самара, 2012. – Ч. 2; С.463 – 466

91. Автоматизация стабилизации температуры керамзита в зоне вспучивания // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре, материалы 67-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2009 года. / Самарск. гос. арх.-строит. ун-т. – Самара, 2010. - 880 с.;

92. Самохвалов О.В. Автоматическая система стабилизации температуры керамзита в зоне вспучивания // Студенческая наука. Исследования в области архитектуры, строительства и охраны окружающей среды: тезисы докладов 30-й юбилейной межвузовской студенческой научно-технической конференции по итогам научно-исследовательской работы студентов в 2010г. / СГАСУ – Самара, 2011. – С. 226

93. Галицков, С.Я. Многоконтурные системы управления с одной измеряемой координатой: Монография. / С.Я. Галицков, К.С. Галицков – Самара: СГАСУ, 2004. – 140с.

94. Бабаев Н.Х. К вопросу оптимизации теплотехнологических параметров процесса обжига цементного клинкера во вращающихся печах // [СПб.], Дух времени, 2008, № 3, <http://www.spiritoftime.net/babaev-1-2.htm>

95. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов – СПб.: Профессия, 2004 – 485 с.

96. Рульнов А.А., Горюнов И.И. Автоматические системы стабилизации материальных потоков в тепловых процессах производства строительных материалов. [Электронный ресурс] По материалам журнала "Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века", сайт: [http://spravstroyamat.ru/view\\_art.php?id\\_=38&lng\\_=ru](http://spravstroyamat.ru/view_art.php?id_=38&lng_=ru)

97. И.И. Горюнов, Оперативное определение качества готового продукта в АСУ ТП обжига вяжущих материалов [Электронный ресурс], сайт: <http://stroim.mos.ru/nauka/d19dr6573m0.html>

98. Сердюк А. И., Сергеев А. И., Корнипаев М. А., Гильфанова Ф. Ф. Стратегия и тактика формирования технического предложения по созданию гибких производственных систем механообработки // Вестник Оренбургского государственного университета. -2006. -№. 1. -С. 138-145.

99. Сергеев, А. И. Применение генетических алгоритмов в структурно-параметрическом синтезе гибких производственных систем/А. И. Сергеев, М. А. Корнипаев, А. А. Корнипаева, А. С. Русяев//СТИН. -2010. -№ 1. -С. 17-21.

100. Сердюк А. И., Сергеев А. И., Корнипаев М. А., Проскурин Д.А. Формализованное описание работы гибких производственных систем при создании систем компьютерного моделирования // СТИН. -2016. -№ 7. -С. 12-18.

101. Галицков С.Я., Галицков К.С., Самохвалов О.В. Электротехнический комплекс обжига керамзита во вращающейся печи // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы докладов II Поволжской научно-практической конференции / под общ. ред. Э.Ю. Абдуллазянова. – В 3 т. Т. 3. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – С. 46 – 49

102. Галицков К.С. Цифровая система автоматического управления частотой и амплитудой колебаний виброуплотнения бетонной смеси: Дис. канд. технические науки: 05.13.06. – Самара, 2002.

103. Дуданов И.В. Автоматизация исполнительных систем гидравлическим экскаватором: Дис. канд. технические науки: 05.13.06. – Самара 2008.

104. Блинчиков О.И. Автоматизация порталного крана с подвесной траверсой (на примере участка автоклавирования ячеистого бетона): Дис. канд. технические науки: 05.13.06. – Самара 2009.

105. Ионов А.А. Автоматизация складирования поддонов при производстве изделий из ячеистого бетона: Дис. канд. технические науки: 05.13.06. – Самара 2010.

106. Никамин В.А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Справочник. – Спб.: КОРОНА принт; М.: “Альтекс-А”, 2003. – 224 с.
107. Ключев В. И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
108. Андреев С.Н. Проектирование приводов манипуляторов. Л.: Машиностроение, 1975. – 312 с.
109. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1971. – 216 с.
110. Фролов К.В. Механика промышленных роботов. М.: Высшая школа, 1988. – 367 с.
111. Бесекерский В.А., Небылов А.В. Робастные системы автоматического управления. М.: Наука, 1983. – 240 с.
112. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
113. Кудрявцев Е.М. Mathcad 11: Полное руководство по русской версии. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 592с.
114. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad. СПб.: Питер, 2005, - 448 с.
115. SolidWorks Flow Simulations 2009 tutorial, 2009 RUS – 244 с.
116. Shackelford J.F. Introduction to Material Science for Engineers/ J.F. Shackelford. 7th Edition - Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2008.
117. Физические величины. Справочник. А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с.
118. К.А. Нохратян Сушка и обжиг в промышленности строительной керамики / К.А. Нохратян. - М. : Госстройиздат, 1962. - 603 с.: ил.
119. Фадеев А.С., Галицков С.Я., Кивран В.К. Математическое моделирование распределения температуры на поверхностях стенки вращающейся печи обжига керамзита // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании. Труды шестой всероссийской межвузовской научно-практической конференции. / СГТУ – Самара, 2007. – 234 с.

120. Дьяконов В.П. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2002, - 448 с.

121. Дьяконов В.П. MATLAB + Simulink. Основы применения. М. Солон-Пресс, 2004. – 768 с.

122. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов; [отв. ред. И.М. Макарова]; Отделение информ. технологий и вычислит. систем РАН. - М.: Наука, 2006. – 333 с. - ISBN 5-02-033782-X (в пер.).

123. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001 – 616с.

124. Моделирование систем: Учебник для студ. высш.учебн.заведений / [С.И. Дворецкий, Ю.Л. Муромцев, В.А. Погодин, А.Г. Схиртладзе]. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 320с.

125. Доманов В.И., Доманов А.В. Элементы систем автоматики (силовой канал). Ул.: УлГТУ, 2007 г. – 107 с.

126. Власов-Власюк О.Б. Экспериментальные методы в автоматике. М.: Машиностроение, 1969, – 412с.

127. Воробьев, В.А. Теория, логическое проектирование, измерение, контроль и диагностика в системах автоматического управления / В.А. Воробьев, А.В. Илюхин, В.И. Марсов, М.Ш. Минцаев, В.П. Попов. – М.: Изд-во Российской инженерной академии, 2009. – 790 с.

128. Морозовский В.Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. М.: Энергия, 1970 – 288 с.

129. Мееров М.В., Литвак Б.Л. Оптимизация систем многосвязного управления. М.: Наука, 1972.

130. Мееров М.В. Системы многосвязного регулирования. М.: Наука, 1965

131. Датчики температуры Rosemount / [www.rosemeter.nt-rt.ru](http://www.rosemeter.nt-rt.ru)

132. ГОСТ Р 8.585-2001 «ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования»

133. Беспроводной измерительный преобразователь Rosemount 648 – техническое описание. – 20с.

134. ГОСТ 8335-96 «Пирометры визуальные с исчезающей нитью. Общие технические условия»

135. Самохвалов О.В. Проектирование устройства крепления датчиков температуры во вращающейся печи обжига // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сборник статей [Электронный ресурс] / СГАСУ. Самара, 2015. С.456 – 460

136. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

137. ГОСТ 15878–79 "Контактная сварка. Соединения сварные"

138. Инженерные основы расчетов деталей машин : учебник / Ю.Е. Гуревич, Б.Я. Выров. М.Г. Косов. М.: КНОРУС, 2013. 480 с.

139. СП 41-103-2000 "Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов".

140. [http://www.promav.ru/price\\_list//ПРАЙС-ЛИСТ-ПРОМА-01.05.17.pdf](http://www.promav.ru/price_list//ПРАЙС-ЛИСТ-ПРОМА-01.05.17.pdf)

141. Каталог двигателей АДЧР [http://www.ruselprom.ru/upload/iblock/912/katalog\\_2014.pdf](http://www.ruselprom.ru/upload/iblock/912/katalog_2014.pdf).

142. Официальный сайт фирмы Schneider Electric, преобразователи частоты Altivar Process ATV900 <http://www.schneider-electric.ru/ru/download/document/DIA2ED2150601EN/>

143. Официальный сайт фирмы Schneider Electric, преобразователи частоты Altivar 312 <http://www.schneider-electric.ru/ru/product-range/2656-altivar-312/?parent-category-id=2900&parent-subcategory-id=2905>.

144. Официальный сайт фирмы Siemens <http://www.siemens-ru.com/taxonomy/term/14>

145. Экономика предприятия: учебник для вузов / под ред. проф. В.Я. Горфинкеля. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Ю НИТИ-ДАНА, 2012. – 767 с. – (Серия «Золотой фонд российских учебников»). ISBN 978-5-238-01284-1

146. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий и цехов по производству керамзитового гравия и песка / ОНТП 11-86; МИНСТРОЙМАТЕРИАЛОВ СССР, Москва, 1986. – 70 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А Методика инженерного проектирования МСАУ ТПОК**

## **1 Исходные данные:**

Основным агрегатом ТПОК (рис. 1.5, глава 1) является вращающаяся печь, в которой под действием дымовых газов, создаваемых пламенем горелки, обжигается керамзит, сырец которого подаётся ленточным питателем. Поэтому необходимо выбрать следующее оборудование (например из [1,5,22,72]):

1.1 типоразмер вращающейся печи;

1.2 тип газовой горелки (горелка должна быть оснащена защитной автоматикой и автоматикой управления для возможности автоматического регулирования тепловой мощности; также горелка должна иметь возможность регулирования геометрии факела для пусконаладочных работ)

1.3 ленточный питатель (вращающаяся печь должна быть оборудована бункером запаса и ленточным питателем для возможности автоматического регулирования загрузки сырца керамзита);

1.4 тип обжигаемого сырья (для получения высокопрочного керамзита наиболее пригодными являются слабовспучивающиеся глины и суглинки [1]).

## **2 Составление требований к МСАУ ТПОК**

Для получения керамзита необходимой прочности  $R$  в соответствии с маркой по прочности  $\Pi_i$  (рис. 3.1, глава 3) должны быть составлены требования к системе автоматического управления (МСАУ ТПОК) на основании зависимостей прочности от температуры и технологических ограничений (пункты 2.4–2.6 главы 2 и пункты 3.1–3.2 главы 3).

## **3 Оборудование для МСАУ ТПОК**

Для системы автоматического управления на основе составленных требований должно быть выбрано следующее оборудование:

3.1 Асинхронные двигатели частотного регулирования (АДЧР) для агрегатов МСАУ ТПОК в соответствии с их мощностью [141]:

- для вращающейся печи;
- для ленточного питателя;
- для блока управления газовой горелкой;

### 3.2 Силовые преобразователи частоты

Для регулирования скорости АДЧР вращающейся печи, ленточного питателя и блока управления газовой горелки в соответствии с их мощностями нужно выбрать силовые преобразователи частоты.

### 3.3 Датчики температуры

Выбор датчиков температуры осуществляется в соответствии с требованиями (пункт 2 методики) по точности МСАУ ТПОК и необходимой прочностью получаемого керамзита.

### 3.4 Устройства приёма и передачи данных

Для отправки измеренных значений температур необходимо выбрать беспроводной преобразователь (проводная передача невозможна вследствие вращения печи) и соответственно беспроводной приёмник, с которого измеренные значения температур будут передаваться на промышленный контроллер.

### 3.5 Выбор контролирующей аппаратуры для МСАУ ТПОК

#### 3.5.1 Выбор промышленного контроллера

Требуется выбрать промышленный контроллер с модульными блоками для МСАУ ТПОК достаточной вычислительной мощности, обеспечивающий высокую скорость обработки данных и возможность подключения другого технологического оборудования для обжига керамзита в случае последующего осуществления комплексной автоматизации всей линии технологического процесса обжига керамзита.

#### 3.5.2 Выбор аппаратуры для управления газовой горелкой

## **4 Проектирование устройства крепления датчиков температуры и преобразователя**

Для автоматического управления обжигом керамзита во вращающейся печи необходимо разработать конструкцию крепления на вращающейся печи датчиков температуры и преобразователя.

### **5 Задание параметров ПИД-регуляторов МСАУ ТПОК в контроллере**

Для работы МСАУ ТПОК необходимо задать в контроллере параметры ПИД-регуляторов каждого канала на основе передаточных функций полученных в результате исследований технологического процесса обжига керамзита (пункт 2.6 глава 2, пункт 4.4 глава 4).

### **6 Включение МСАУ ТПОК**

Запуск и работа МСАУ ТПОК должна осуществляться на основе разработанного алгоритм запуска и работы МСАУ ТПОК (рис. 3.5, глава 3). Начальные этапы 1-11 алгоритма включают подготовительные операции по пуску вращающихся печей при производстве керамзита, последующие этапы 12-26 представляют собой поочерёдное включение каналов МСАУ ТПОК.

### **7 Выбор значений температур для вектора задающих сигналов проектируемой МСАУ ТПОК**

Выбор трёх значений температур  $T_F$ ,  $T_A$  и  $T_C$  вектора задающих сигналов осуществляется на основе положения рабочей точки. Теоретической основой выбора положения рабочей точки синтезируемой МСАУ ТПОК является отображение прочностных характеристик керамзита в пространстве управляемых температурных режимов. Использование этого пространства (рис. 3.1, глава 3) позволяет осуществить как рациональный выбор комплекса, состоящего из трёх значений температурных режимов  $T_F$ ,  $T_A$  и  $T_C$  в опорных сечениях, так и выполнить задачу анализа эффективности используемых режимов управления печью. Данное обстоятельство создаёт предпосылки для производства керамзита заданной прочности  $R$  и необходимой плотности  $\rho$  с минимумом энергозатрат [36], для этого нужно осуществлять производство керамзита требуемой марки по прочности сдвигаясь к нижнему значению  $R$  в пределах определённой марки, т.е. рабочая точка системы автоматического управления должна находиться в точке  $L_i$  рассматриваемых параллелепипедов, а значения температур должны выбираться из таблицы А.1 в соответствии с требуемой маркой  $\Pi_i$  и прочностью  $R$  керамзита.

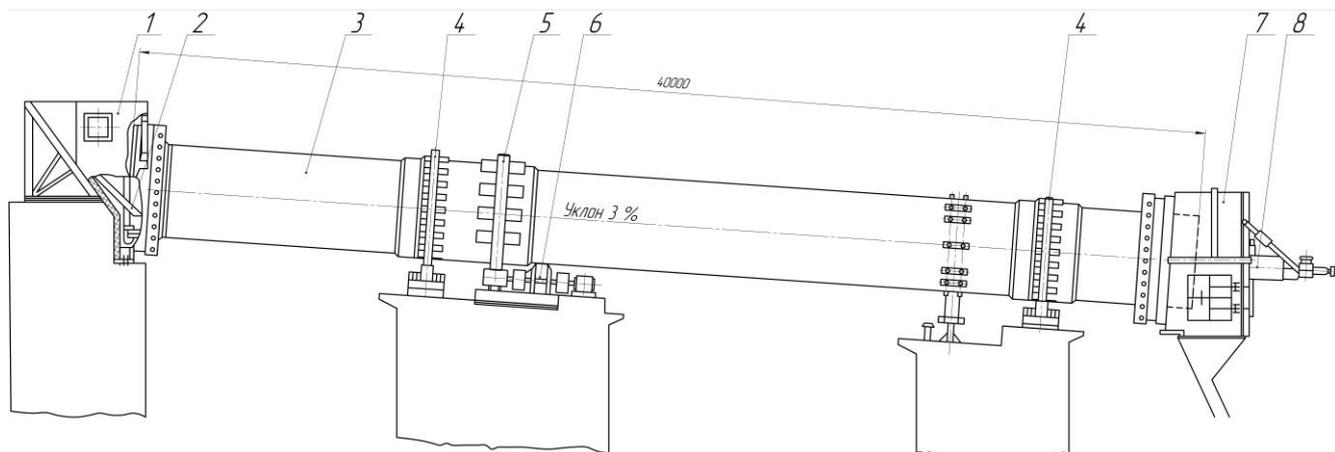
Таблица А.1 – Значения температур и управляющих воздействий для марок керамзита П200 – П350 по прочности

			$T_F, ^\circ\text{C}$	$T_A, ^\circ\text{C}$	$T_C, ^\circ\text{C}$	$\omega_{\text{п}}, \text{рад/с}$	$q_3, \text{т/ч}$	$G_{\text{г}}, \text{м}^3/\text{с}$	$V_{\text{г}}/V_{\text{к}}, \text{м}^3/\text{м}^3$
П200	R = 4,5	Точка L	375	825	1035	0,23	12,15	0,1805	38,38
	R = 5	Точка S	425	857,5	1055	0,193	11,48	0,1865	41,45
	R = 5,5	Точка М'	475	890	1035	0,165	10,79	0,1805	43,26
П250	R = 5,5	Точка L	475	890	1005	0,165	10,79	0,1715	40,88
	R = 6	Точка S	532,5	905	1020	0,134	10,32	0,176	43,93
	R = 6,5	Точка М'	590	920	1005	0,12	9,84	0,1715	44,53
П300	R = 6,5	Точка L	590	920	980	0,12	9,84	0,164	43,94
	R = 7,25	Точка S	670	955	992,5	0,1036	8,75	0,1677	50,5
	R = 8	Точка М'	750	990	980	0,0927	7,64	0,164	56,51
П350	R = 8	Точка L	750	990	960	0,0927	7,64	0,158	53,68
	R = 9	Точка S	805	1027,5	970	0,086	6,08	0,161	65,56
	R = 10	Точка М'	900	1065	960	0,08	4,5	0,158	78,75

## Пример проектирования МСАУ ТПОК для вращающейся печи 2,5×40м

### 1 Исходные данные

1.1 Типоразмер вращающейся печи 2,5×40м (рис. А.1) (характеристики печи – пункт 1.2, глава 1).



- 1 – пылесадительная камера; 2 – питательная течка; 3 – корпус печи;  
 4 – роlikоопоры; 5 – зубчатая венцовая шестерня; 6 – основной привод;  
 7 – разгрузочная головка печи; 8 – горелка (форсунка).

Рисунок А.1 – Цилиндрическая однобарабанная вращающаяся печь для производства керамзита типоразмера 40×2,5 м

1.2 Газовая горелка с регулируемой геометрией факела С 199-08-100 (рис. А.2) (табл. А.2)

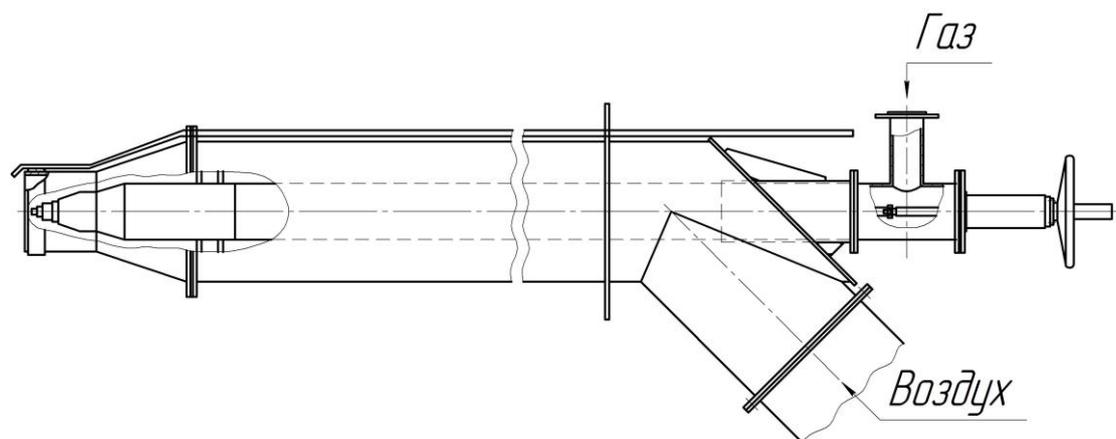


Рисунок А.2 – Устройство газовой горелки С 199-08-100

Таблица А.2 – Технические характеристики горелки

№	Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра
1	Расход газа	м <sup>3</sup> /час	800
2	Давление газа перед горелкой	Па	3000
3	Давление воздуха перед горелкой	Па	1600
4	Тепловая мощность	МВт	7-9,3
5	Основные размеры длина диаметр	мм	4460
			430
6	Масса	кг	725

### 1.3 Ленточный питатель типа ПЛ1

1.4 В качестве обжигаемого сырья (пункт 1.1, глава 1) выбран слабовспучивающийся суглинок бескудниковского месторождения.

## 2 Составление требований к МСАУ ТПОК

Для того, чтобы производить керамзит требуемых марок с заданными параметрами прочности и насыпной плотности необходимо, во-первых, выполнить преобразования требуемых физических характеристик керамзита в технологические параметры его производства [37,88-90]. Наиболее информативной характеристикой производства керамзита является кривая его обжига во вращающейся печи [1], на которой в явном виде или опосредованно отражаются как физико-химические свойства исходного сырья, так и особенности конструкции печи и способы воздействия на температурное поле керамзита в этой печи (рис. 1.3, глава 1). Результаты экспериментальных исследований процесса

обжига керамзита позволили установить однозначную связь насыпной плотности и прочностных характеристик керамзита с параметрами кривой обжига [1].

Во-вторых, синтезированная МСАУ ТПОК, должна обеспечивать создание в печи желаемого температурного поля (соответствующего требуемой кривой обжига) в условиях ограничений, обусловленных характеристиками сырья и конструкцией печи, и при действии помех на процесс обжига.

Известно, что изменение температуры на  $15^{\circ}\text{C}$  приводит к изменению объёмного веса примерно на  $150 \text{ кг/м}^3$  и приводит к получению другой марки керамзита относительно требуемой, при этом прочность изменяется примерно на  $1,5 \text{ МПа}$ , поэтому, аналогично исследованиям [14,82] зададимся требуемой точностью поддержания температуры  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

### 3 Оборудование для МСАУ ТПОК

Для системы автоматического управления на основе составленных требований выбрано следующее оборудование:

3.1 асинхронные двигатели частотного регулирования (АДЧР) для агрегатов МСАУ ТПОК в соответствии с их мощностью [141]:

3.1.1 для вращающейся печи – АДЧР225М8У3ДВНЗ (табл. А.3).

Таблица А.3 – Параметры асинхронного двигателя АДЧР225М8У3ДВНЗ вращающейся печи

Номинальная мощность $P_n$ , кВт	30
Синхронная частота вращения $n_s$ , об/мин	750
КПД двигателя $\eta_{дв}$ , %	90,5
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,81
Номинальное напряжение $U_n$ , В	380
Частота питающей сети $f_1$ , Гц	50
Номинальное скольжение $s_n$	0,018
Момент инерции $J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	0,74
Число пар полюсов $p_p$	4
Параметры схемы замещения	
Активное сопротивление статора $r_1$ , Ом	0,1517
Активное сопротивление ротора, приведённое к статору $r'_2$ , Ом	0,0705
Реактивное сопротивление статора $x_1$ , Ом	0,4046
Реактивное сопротивление ротора, приведённое к статору $x'_2$ , Ом	0,5448
Реактивное сопротивление главного потока $x_\mu$ , Ом	8,1603

## 3.1.2 для ленточного питателя – АДЧР80МА2У3ДВНЗ (табл. А.4)

Таблица А.4 – Параметры асинхронного двигателя АДЧР80МА2У3ДВНЗ ленточного питателя

Номинальная мощность $P_n$ , кВт	1,5
Синхронная частота вращения $n_s$ , об/мин	3000
КПД двигателя $\eta_{дв}$ , %	81
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,85
Номинальное напряжение $U_n$ , В	380
Частота питающей сети $f_1$ , Гц	50
Номинальное скольжение $s_n$	0,042
Момент инерции $J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	0,0018
Число пар полюсов $p_p$	1
Параметры	
схемы замещения	
Активное сопротивление статора $r_1$ , Ом	0,0823
Активное сопротивление ротора, приведённое к статору $r'_2$ , Ом	0,0471
Реактивное сопротивление статора $x_1$ , Ом	0,05
Реактивное сопротивление ротора, приведённое к статору $x'_2$ , Ом	0,0778
Реактивное сопротивление главного потока $x_\mu$ , Ом	2,5

## 3.1.3 для блока управления газовой горелкой – АДЧР63В2У3ДВНЗ (табл. А.5)

Таблица А.5 – Параметры асинхронного двигателя АДЧР63В2У3ДВНЗ блока управления газовой горелкой

Номинальная мощность $P_n$ , кВт	0,55
Синхронная частота вращения $n_s$ , об/мин	3000
КПД двигателя $\eta_{дв}$ , %	73
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,86
Номинальное напряжение $U_n$ , В	380
Частота питающей сети $f_1$ , Гц	50
Номинальное скольжение $s_n$	0,085
Момент инерции $J_{дв}$ , кг·м <sup>2</sup>	0,0009
Число пар полюсов $p_p$	1
Параметры схемы замещения	
Активное сопротивление статора $r_1$ , Ом	0,1275
Активное сопротивление ротора, приведённое к статору $r'_2$ , Ом	0,0923
Реактивное сопротивление статора $x_1$ , Ом	0,0481
Реактивное сопротивление ротора, приведённое к статору $x'_2$ , Ом	0,0798
Реактивное сопротивление главного потока $x_\mu$ , Ом	2,5

Выбранные двигатели оснащены инкрементальными энкодерами и независимым охлаждением, также вспомогательный двигатель оснащён тормозом для проведения футеровочных работ.

### 3.2 Силовые преобразователи частоты

Для регулирования скорости АДЧР вращающейся печи, ленточного питателя и блока управления газовой горелки в соответствии с их мощностями подобраны соответствующие силовые преобразователи частоты производства Schneider Electric [142,143]:

3.2.1 для вращающейся печи – Altivar 900 ATV950D37N4 (табл. А.6)

Таблица А.6 – Параметры СПЧ ATV950D37N4

Параметры	ATV950D37N4
Мощность двигателя	до 37 кВт
Номинальное напряжение питания	380 В
Частота сети питания	50...60Гц (- 5...5 %)
Число фаз сети	3 фазы
Линейный ток	84 А для 380 В 3 фазы 37 кВт
Полная мощность	55,3кВ·А
Макс. переходной ток	118,5 А для 60 с 3 фазы
Рассеиваемая мощность	61 Вт при номинальной нагрузке
Степень защиты IP	IP20 на верхней части без закрывающей пластины IP41 на верхней части IP54 на нижней части
Пределы напряжения питания	323 – 550 В
Пределы частоты сети	47,5 – 63 Гц
Переходная перегрузка по вращающему моменту	170 % от номинального крутящего момента электродв +/- 10 % для 60 с 220 % от номинального крутящего момента электродв +/- 10 % для 2 с
Масса продукта	37 кг

3.2.2 для ленточного питателя – Altivar 312 ATV312HU15N4B (табл. А.7)

Таблица А.7 – Параметры СПЧ ATV312HU15N4B

Параметры	ATV312HU15N4B
Мощность двигателя	1,5 кВт
Номинальное напряжение питания	380...500 В (- 15...10 %)
Частота сети питания	50...60Гц (- 5...5 %)
Число фаз сети	3 фазы
Линейный ток	6,4А для 380 В
Полная мощность	4,2 кВт·А
Макс. переходной ток	6,2 А для 60 с
Рассеиваемая мощность	61 Вт при номинальной нагрузке
Степень защиты IP	IP41 на верхней части IP31 на верхней части IP20 на верхней части без закрывающей пластины
Пределы напряжения питания	323 – 550 В
Пределы частоты сети	47,5 – 63 Гц
Переходная перегрузка по вращающему моменту	170...200 % от номинального крутящего момента электродвигателя
Габаритные размеры (В×Ш×Г) мм	143×107×152
Масса продукта	1,8 кг

3.2.3 для блока управления газовой горелкой – Altivar 312 ATV312H055N4B (табл. А.8).

Таблица А.8 – Параметры СПЧ ATV312H055N4B

Параметры	ATV312H055N4B
Мощность двигателя	0,55 кВт
Номинальное напряжение питания	380...500 В (- 15...10 %)
Частота сети питания	50...60Гц (- 5...5 %)
Число фаз сети	3 фазы
Линейный ток	2,8А для 380 В
Полная мощность	1,8 кВт·А
Макс. переходной ток	2,9 А для 60 с
Степень защиты IP	IP41 на верхней части IP31 на верхней части IP20 на верхней части без закрывающей пластины
Пределы напряжения питания	323 – 550 В
Пределы частоты сети	47,5 – 63 Гц
Переходная перегрузка по вращающему моменту	170...200 % от номинального крутящего момента электродвигателя
Габаритные размеры (В×Ш×Г) мм	143×107×152
Масса продукта	1,8 кг

### 3.3 Датчики температуры

В качестве датчиков температуры выбраны термопары Rosemount 1075 [131], представляющий собой термоэлектрический преобразователь – термопары типа S: Pt/Rh (+) и Pt (–), которые применяются для преобразования температуры в ЭДС. Преобразователь (термопара) Rosemount 1075 предназначен для непрерывного измерения температуры в газообразных агрессивных средах в температурном диапазоне 0...1600°C. Предел допускаемой основной погрешности,  $\pm 1^\circ\text{C}$  [131,132]. Термопары подключаются к преобразователям, таких комплектов, состоящих из термопары и преобразователя три. Один – на расстоянии 11 м (сечение F), второй – на 30 м (сечение A), третий – 35 м (сечение C) от холодного торца печи.

### 3.4 Устройства приёма и передачи данных

Для отправки измеренных значений температур на приёмник предлагается использовать беспроводной преобразователь Rosemount 648 [85,133,136]. Он позволяет передавать измеренные параметры от термопары, путём их преобразования в радиосигнал частотой 2,4 ГГц и отправки в информационную систему через беспроводной шлюз Rosemount 1420. Шлюз является приёмником радиосигналов (на рабочей частоте 2,4 – 2,5 ГГц по протоколу WirelessHART) от беспроводных приборов, которые впоследствии преобразуются в формат, совместимый с различными системами управления, поддерживает одновременное подключение до 100 беспроводных измерительных приборов [131].

### 3.5 Выбор контролирующей аппаратуры для МСАУ ТПОК

#### 3.5.1 Выбор промышленного контроллера

В качестве управляющего устройства предлагается использовать контроллер SIMATIC S7-1500 фирмы Siemens [144]. Он имеет модульную конструкцию, возможность применения структур локального и распределенного ввода-вывода, широкие коммуникационные возможности, множество функций, поддерживаемых на уровне операционной системы. Удобство эксплуатации и обслуживания обеспечивают возможность получения рентабельных решений для построения систем автоматического управления в различных областях промышленного производства.

Для контроллера выбраны:

- центральный процессор CPU 1518F-4 PN/DP (табл. А.9)
- блок питания PM 1507
- шина PROFIBUS для обмена данными с беспроводным шлюзом Rosemount 1420

Таблица А.9 – Параметры CPU 1518F-4 PN/DP

Параметры	CPU 1518F-4 PN/DP
Рабочая память, RAM:	
для выполнения программ	4.5 МБ
для хранения данных	10 МБ
Загрузочная память: SIMATIC Memory card	до 32 Гбайт
Время выполнения операций, нс:	
- логических	1
- с фиксированной точкой	2
- с плавающей точкой	6
Кол-во флагов/ таймеров, счетчиков	131072/ 2 048/ 2 048
Количество модулей ввода-вывода на систему, не более	8192
Встроенные интерфейсы	PROFIBUS, до 12 Мбит/с
Габариты (Ш×В×Г), мм	70×125×130

### 3.5.2 Выбор аппаратуры для управления газовой горелкой

Управления газовой горелкой осуществляется при помощи [140]:

- блока розжига запальника БРЗ-04М1-2К – для автоматического управления процессом розжига ЗЗУ, контроля пламени запальника и горелки. Связь с контроллерами осуществляется по интерфейсу RS-485;

- блока защиты и контроля микропроцессорного БЗК-М – индикация состояния технологической установки по двенадцати параметрам, контроля факела горелок по трём каналам и выдачи звукового сигнала и отключения подачи топлива в случае аварии по какому-либо параметру;

- заслонки газовой с электроприводом – ЗГП 100;

- шкафа управления ПРОМА-РТИ-304.

#### 4 Разработка устройства крепления датчиков температуры и преобразователя

Для автоматического управления обжигом керамзита во вращающейся печи необходимо измерение температуры керамзита в нескольких сечениях по её длине [33,135]. Ввиду того, что печь вращается и технологический процесс протекает при достаточно высоких температурах (300-1200°C), разработана конструкция крепления датчиков в печи. Она представляет собой термопару в защитном кожухе (рис. А.3), которая вставлена в стакан, приваренный четырьмя уголками к наружной поверхности вращающейся печи. Rosemount 648 помещён в стальной цилиндр, закреплённый на двутавре, который в свою очередь приваривается к вращающейся печи (рис. А.3). К клеммному отсеку подключается первичный преобразователь Rosemount 1075. Предлагаемая конструкция крепления датчиков позволяет наблюдать температуру непосредственно в конкретном сечении печи.



Рисунок А.3 – Конструкция крепления термопар и преобразователей

Rosemount 648 на вращающейся печи

## 5 Задание параметров ПИД-регуляторов МСАУ ТПОК в контроллере

Для работы МСАУ ТПОК необходимо задать в контроллере параметры ПИД-регуляторов каждого канала на основе передаточных функций полученных в результате исследований технологического процесса обжига керамзита (табл. А.10).

Таблица А.10 – Параметры регуляторов

САУ в сечении F	САУ в сечении А	САУ в сечении С
$K_{1П} = 0,0002$	$K_{1П} = 0,001$	$K_{1П} = 0,1$
$T_{1И} = 500$	$T_{1Д} = 1$	$T_{1Д} = 300$
$K_{2П} = 0,004$	$K_{2П} = 0,026$	$K_{2П} = 0,0025$
$T_{2И} = 350$	$T_{2И} = 500$	$T_{2И} = 250$

## 6 Включение МСАУ ТПОК

Запуск и работа МСАУ ТПОК должна осуществляться на основе разработанного алгоритм запуска и работы МСАУ ТПОК (рис. 3.5, глава 3). Начальные этапы алгоритма включают подготовительные операции по пуску вращающихся печей при производстве керамзита, последующие этапы представляют собой поочерёдное включение каналов МСАУ ТПОК:

6.1 Разгон вспомогательного привода при помощи программного задатчика траектории (ПЗТ) до скорости  $\omega_1 = 0,0068$  рад/с;

6.2 Обкатка печи в течение 4 часов;

6.3 Переключение на главный привод замыканием ключа К4 и разгон при помощи ПЗТ до скорости  $\omega_2 = 0,26$  рад/с;

6.4 Обкатка печи в течение 6 часов;

6.5 Переключение на вспомогательный привод размыканием ключа К4 и разгон при помощи ПЗТ до скорости  $\omega_1 = 0,0068$  рад/с, включение горелки на короткий факел;

6.6 Первый этап сушки футеровки в течение 16 часов;

6.7 Второй этап сушки футеровки в течение 16 часов;

6.8 Переключение на главный привод замыканием ключа К4 и разгон при помощи ПЗТ до скорости  $\omega_2 = 0,26$  рад/с;

6.9 Третий этап сушки (разогрев) футеровки в течение 16 часов;

6.10 Включение МСАУ ТПОК без обратных связей по Т в каналах  $T_F, T_A, T_C$  переключение горелки на длинный факел;

6.11 Включение ленточного питателя, для загрузки печи сырцом керамзита;

6.12 Определение  $T_{F3}, T_{A3}, T_{C3}$  в блоке ФЗС, в зависимости от  $R_{тр}$ , заданной в ЗУ;

6.13 Замыкание ключа К1 в канале  $T_F$  через 25 мин после включения ленточного питателя;

6.14 Замыкание ключа К2 в канале  $T_A$  через 65 мин после включения ленточного питателя;

6.15 Замыкание ключа К3 в канале  $T_C$  через 75 мин после включения ленточного питателя;

6.16 Автоматическая проверка соответствия температур (программируется в контроллере) сырца керамзита заданным значениям в сечениях F, A и C ( $T_F = T_{F3}$ ,  $T_A = T_{A3}$ ,  $T_C = T_{C3}$ ) при помощи блоков 16, 17, 20, 25 алгоритма (рис. 3.5, глава 3) ;

6.17 Автоматическая коррекция температур в сечениях F, A и C (при несоответствии температур заданным) изменением скорости вращения печи, загрузки сырца керамзита, объёмной тепловой мощности горелки соответственно, при помощи блоков 18, 19, 21, 22-24, 27-29 алгоритма.

## **7 Выбор значений температур для вектора задающих сигналов проектируемой МСАУ ТПОК**

Для получения керамзита марки П350 с прочностью  $R = 8$  МПа в пространстве управляемых температурных режимов (рис. 3.1, глава 3) выбрана точка  $L_i$ . Далее из таблицы 1 (данной методики) выбраны значения трёх температур  $T_F = 750^\circ\text{C}$ ,  $T_A = 990^\circ\text{C}$  и  $T_C = 960^\circ\text{C}$ .

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения в практику инженерного использования**



**ПРИЛОЖЕНИЕ В Акты внедрения в учебный процесс**

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Самарский государственный архитектурно-строительный университет»



«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор СГАСУ, профессор

Н.Г. Чумаченко

2014г.

А К Т

внедрения результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс СГАСУ

1. Название темы: Автоматизация производства керамзита с регулируемым диапазоном прочности
2. Основание для выполнения исследований: тематический план госбюджетных научно-исследовательских работ СГАСУ «Синтез интеллектуальных систем автоматического управления технологическими процессами производства бетонных изделий и керамических материалов» (№7.5617.2011 госрегистрации) по направлению «Автоматизированные системы в строительстве» (№ 01970005686 Госрегистрации от 23.05.2007г.)
3. Исполнитель: кафедра «Механизация, автоматизация и энергоснабжение строительства», исследовательская группа в составе д.т.н., проф. Галицков С.Я., к.т.н., доцент Галицков К.С., к.т.н., доцент Фадеев А.С., аспирант Самохвалов О.В.
4. Основное содержание результатов исследований:
  - 4.1. Математическое моделирование технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи как объекта управления с распределёнными параметрами и синтез на её основе многомерной системы автоматического управления прочностью керамзита с тремя управляющими воздействиями (объёмная тепловая мощность  $Q_3$  горелки, величина загрузки  $q_3$  печи и скорость вращения печи  $\omega_n$ ) и с вектором выходных координат, включающим в себя значения температуры керамзита в трёх сечениях печи характеризующих кривую обжига и величину прочности керамзита.
5. Данные о внедрении:

Разработки НИР, используемые в учебном процессе	Масштабы внедрения		Год внедрения
	Факультет, кафедра, специальность	Учебная дисциплина	
1. Математическое описание обжига керамзита во вращающейся печи, содержащее в себе информацию о формировании прочности керамзита, как объекта управления с распределёнными параметрами	Строительно-технологический факультет, кафедра МАЭС, специальность 270113 «Механизация и автоматизация строительства», магистерская программа 270814 «Комплексная механизация строительства»	Идентификация объектов управления	2013

2. Структурный синтез интеллектуальной системы автоматического управления обжигом керамзита во вращающейся печи по заданной величине прочности керамзита	Строительно-технологический факультет, кафедра МАЭС, специальность 270113 «Механизация и автоматизация строительства», магистерская программа 270814 «Комплексная механизация строительства»	Автоматизация промышленных установок и технологических комплексов	2013
2. Вычислительная модель цифровой многомерной системы автоматического управления обжигом керамзита во вращающейся печи с регулируемым диапазоном прочности	Строительно-технологический факультет, кафедра МАЭС, специальность 270113 «Механизация и автоматизация строительства», магистерская программа 270814 «Комплексная механизация строительства»	Цифровое моделирование систем автоматизации	2013

## 6. Результаты внедрения:

Разработки НИР, используемые в учебном процессе	Педагогический, социальный аспект внедрения
1. Расчетные схемы, уравнения движения, структурные схемы процесса обжига керамзита во вращающейся печи. Вычислительная модель объекта управления в программной среде SolidWorks. Методика аппроксимации модели обжига с распределёнными параметрами моделью с сосредоточенными параметрами. Методика определения параметров моделей.	Используется студентами специальности 270113 «Механизация и автоматизация строительства» и магистрантами программы 270814 «Комплексная механизация строительства» при курсовом, дипломном проектировании, при подготовке магистерских диссертаций. Способствует закреплению базовых знаний в области математического описания сложных нелинейных промышленных объектов управления с распределёнными параметрами.
2. Структурный синтез цифровой многомерной интеллектуальной системы автоматического управления обжигом керамзита во вращающейся печи. с использованием элементов ассоциативной памяти. Параметрическая оптимизация регуляторов системы. Вычислительная модель системы автоматического управления обжигом керамзита в программной среде MatLab. Методика проведения экспериментов по исследованию динамики системы автоматического управления по отношению к управляющим и возмущающим воздействиям	Используется студентами специальности 270113 «Механизация и автоматизация строительства» и магистрантами программы 270814 «Комплексная механизация строительства» при дипломном, курсовом проектировании, при подготовке магистерских диссертаций, при изучении, исследовании многомерных цифровых систем автоматического управления. Повышает уровень профессиональной подготовки инженеров и магистров в области использования программных средств для ускорения проектирования и настройки цифровых систем управления технологическими процессами и установками.

## 7. Выводы методической комиссии специальности:

Использование результатов работы в учебном процессе способствует повышению уровня профессиональной подготовки студентов специальности 270113 «Механизация и автоматизация строительства» и магистрантов, обучающихся по программе 270814 «Комплексная механизация строительства»

Проректор по учебной работе,  
профессор  
Декан строительно-  
технологического факультета,  
доцент




А.А. Гилев

К.С. Галицков

Научный руководитель исследовательской группы  
зав. кафедрой МАЭС, профессор



С.Я. Галицков



**ПРИЛОЖЕНИЕ Г Патент на изобретение**

4/14

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2554964

## СПОСОБ ОБЖИГА КЕРАМЗИТА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Самарский государственный архитектурно-строительный университет" (СГАСУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014104118

Приоритет изобретения **05 февраля 2014 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **03 июня 2015 г.**

Срок действия патента истекает **05 февраля 2034 г.**

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** <sup>(11)</sup> **2 554 964** <sup>(13)</sup> **С1**(51) МПК  
C04B 20/04 (2006.01)  
F27B 7/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014104118/03, 05.02.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
05.02.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 05.02.2014

(45) Опубликовано: 10.07.2015 Бюл. № 19

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: ГАЛИЦКОВ С.Я. и др., Структурный синтез системы управления вспучиванием керамзита во вращающейся печи, Современные проблемы науки и образования, 2012, N 1. RU 117593 U1, 27.06.2012. SU 952822 A1, 23.08.1982. SU 989536 A1, 15.01.1983. SU 392317 A, 17.12.1973. SU 278513 A, 28.10.1970. ФАДЕЕВ А.С. Автоматизация технологического процесса вспучивания (см. прод.)

Адрес для переписки:

443001, г.Самара, ул. Молодогвардейская, 194,  
СГАСУ, патентный отдел

(72) Автор(ы):

Галицков Станислав Яковлевич (RU),  
Самохвалов Олег Владимирович (RU),  
Фадеев Александр Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования "Самарский  
государственный архитектурно-  
строительный университет" (СГАСУ) (RU)

RU 2 5 5 4 9 6 4 С 1

RU 2 5 5 4 9 6 4 С 1

(54) СПОСОБ ОБЖИГА КЕРАМЗИТА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО  
ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

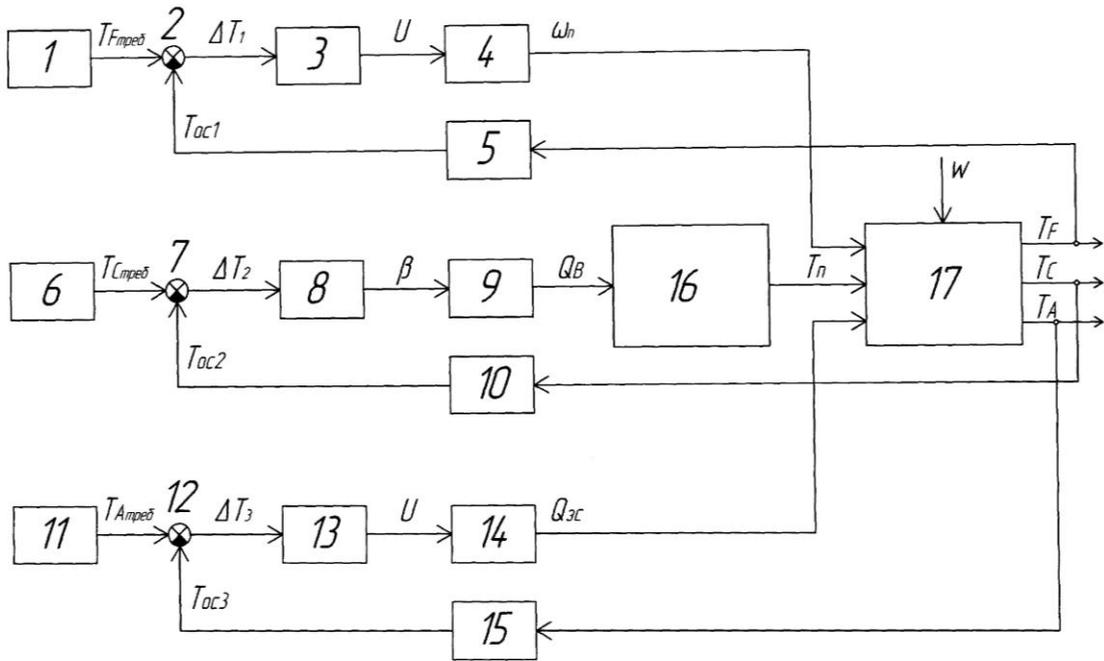
(57) Реферат:

Изобретение относится к технологии обжига строительных материалов и может быть использовано при производстве керамзита. Способ обжига керамзита во вращающейся печи включает задание требуемых значений температуры керамзита в точке, соответствующей концу зоны нагрева, и температуры в точке, соответствующей середине зоны вспучивания, определение температуры в точке, соответствующей концу зоны нагрева, и температуры в точке, соответствующей середине зоны вспучивания, определение разности между требуемым и имеющимся значением температуры керамзита в точке, соответствующей концу зоны нагрева, формирование в функции величины разности этих температур управляющего воздействия на привод ленточного питателя,

определение разности между требуемым и имеющимся значением температуры керамзита в точке, соответствующей середине зоны вспучивания, формирование в функции величины разности этих температур управляющего воздействия на горелку печи, дополнительно задают требуемое значение температуры керамзита в точке, соответствующей концу зоны сушки, определяют температуру в точке, соответствующей концу зоны сушки, определяют разность между требуемым и имеющимся значением температуры керамзита в точке, соответствующей концу зоны сушки, формируют в функции величины разности этих температур управляющее воздействие на привод вращения печи. Изобретение также относится к устройству для обжига керамзита. Технический результат -

повышение качества керамзита, в том числе и его прочности, сокращение количества технологического отхода при производстве

керамзита, стабилизация процесса обжига. 2 н.п. ф-лы, 2 ил.



Фиг. 1

(56) (продолжение):

керамзита во вращающейся печи, диссертация на соискание учёной степени к.т.н, Самара, 2011, с. 5 - 10

RU 2554964 C1

RU 2554964 C1

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY(19) **RU** (11) **2 554 964**<sup>(13)</sup> **C1**

(51) Int. Cl.

*C04B 20/04* (2006.01)*F27B 7/00* (2006.01)(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2014104118/03, 05.02.2014

(24) Effective date for property rights:  
05.02.2014

Priority:

(22) Date of filing: 05.02.2014

(45) Date of publication: 10.07.2015 Bull. № 19

Mail address:

443001, g.Samara, ul. Molodogvardejskaja, 194,  
SGASU, patentnyj otdel

(72) Inventor(s):

Galitskov Stanislav Jakovlevich (RU),  
Samokhvalov Oleg Vladimirovich (RU),  
Fadeev Aleksandr Sergeevich (RU)

(73) Proprietor(s):

Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe  
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego  
professional'nogo obrazovanija "Samarskij  
gosudarstvennyj arkhitekturno-stroitel'nyj  
universitet" (SGASU) (RU)(54) **METHOD FOR BURNING EXPANDED CLAY IN ROTARY KILN AND DEVICE FOR ITS IMPLEMENTATION**

(57) Abstract:

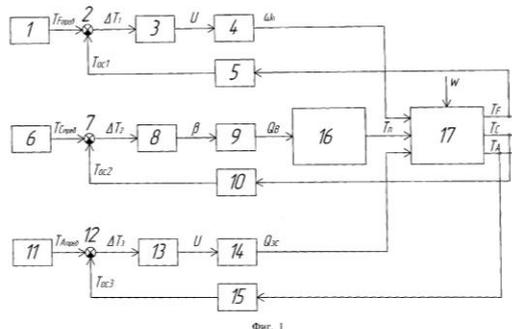
FIELD: construction.

SUBSTANCE: method for burning the expanded clay in the rotary kiln comprises assignment of the required values of the expanded clay temperature at point corresponding to the end of the heating zone, and temperature at point corresponding to the middle zone of swelling, determination of temperature at point corresponding to the end of the heating zone, and temperature at point corresponding to the middle zone of swelling, determination of difference between the required and actual value of temperature of expanded clay at point corresponding to the end of the heating zone, formation in function of difference magnitude of these temperatures of control influence on drive of belt feeder, definition of difference between the required and actual value of the expanded clay temperature at point corresponding to the middle zone of swelling, formation in function of difference magnitude of these temperatures of control influence on the furnace burner, the required value of the expanded clay temperature at point corresponding to the end of the drying zone is specified additionally, temperature at point corresponding to the end of the drying zone is

determined, difference between the required and actual value of the expanded clay temperature at point corresponding to the end of the drying zone is determined, control influence on drive of the furnace rotation is formed in function of difference magnitude of these temperatures. Invention also relates to the device for the expanded clay burning.

EFFECT: improving the quality of expanded clay, including its strength, reducing the number of process wastes during the production of expanded clay, stabilization of burning process.

2 cl, 2 dwg



RU 2 554 964 C 1

RU 2 554 964 C 1