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)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Самара 2018

Работа выполнена на кафедре «Механизация, автоматизация и энергоснабжение строительства» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Галицков Станислав Яковлевич

Официальные оппоненты: – доктор технических наук, профессор
Елсуков Владимир Сергеевич
профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск

– доктор технических наук, доцент
Сергеев Александр Иванович
профессор кафедры «Системы автоматизации производства» ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород

Защита состоится «3» декабря 2018 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.07 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ) по адресу: Россия, г. Самара, ул. Галактионовская, 141, корпус № 6, аудитория 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: 443100, г. Самара, ул. Первомайская, 18, а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу: http://d21221707.samgtu.ru

Отзывы о данной работе в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, г. Самара, Молодогвардейская ул. 244, СамГТУ, Главный корпус, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.217.07, тел.: (846) 278-44-96, факс: (846) 278-44-00; e-mail: 212.217.07@mail.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2018 г.

Учёный секретарь
Диссертационного совета Д 212.217.07
доктор технических наук А.М. Абакумов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

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.

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. Последовательность фазовых переходов исходного сырья в готовый строительный материал (керамзит) выполняется поэтапно при помощи технологического комплекса производства керамзита. Сначала глина поступает в глиносмеситель, формуется 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.

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, информирования о внештатных ситуациях и т.д., 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. 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, 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.

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, B.M. Gallaway, B. Martin, J. Ries и многие другие.

Ведущими институтами, изучающими пористые заполнители, являются: отечественный НИИКерамзит 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.

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.

Структурному синтезу систем управления с распределенными параметрами посвящены работы А.Г. Бутковского, Э.Я. Рапопорта, Л.М. Пустыльникова и др., синтезу систем автоматического управления производством керамзита – С.Я. Галицкова, К.С. Галицкова, А.С. Фадеева 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 $\omega_п$ печи, величина загрузки $q_з$ печи, объёмная тепловая мощность $Q_г$ 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 натурных 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^3 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень проработанности темы исследования, определены цель и задачи диссертации, представлены используемые методология и методы исследования, отражены основные положения, выносимые на защиту, показаны их научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе описан технологический комплекс производства керамзита (рис. 1). Главным его агрегатом является вращающаяся печь, в которую ленточным питателем подаются гранулы сырца керамзита, обжигаемые под действием дымовых газов, создаваемых пламенем горелки.

Установлено, что существенное различие при получении лёгкого или прочного керамзита заключается в процессе управления формой кривой обжига. При производстве лёгкого керамзита заданной плотности управление может осуществляться двумя воздействиями: загрузкой $q_з$ сырца и объёмной тепловой мощностью $Q_г$ горелки. При этом в кривой обжига (рис. 2, кривые 4-6) создаётся значительный технологический перепад по температуре между зонами нагрева и вспучивания. Это необходимо для получения требуемого значения насыпной плотности ρ.

При изготовлении прочного керамзита кривая обжига (рис. 2, кривые 1-3) в зонах сушки и нагрева должна иметь монотонно нарастающий характер и сохранять постоянство температуры в зоне вспучивания (в диапазоне 950–1100°С). С этой целью в технологическом процессе используется третье управляющее воздействие – скорость $\omega_п$ вращения печи, влияющее на форму кривой обжига в конце зоны сушки и в значительной мере определяющее величину прочности R керамзита. В результате векторного управления тремя компонентами ($\omega_п$ $q_з$, $Q_г$,) создаётся характерная монотонно нарастающая кривая обжига прочного керамзита.

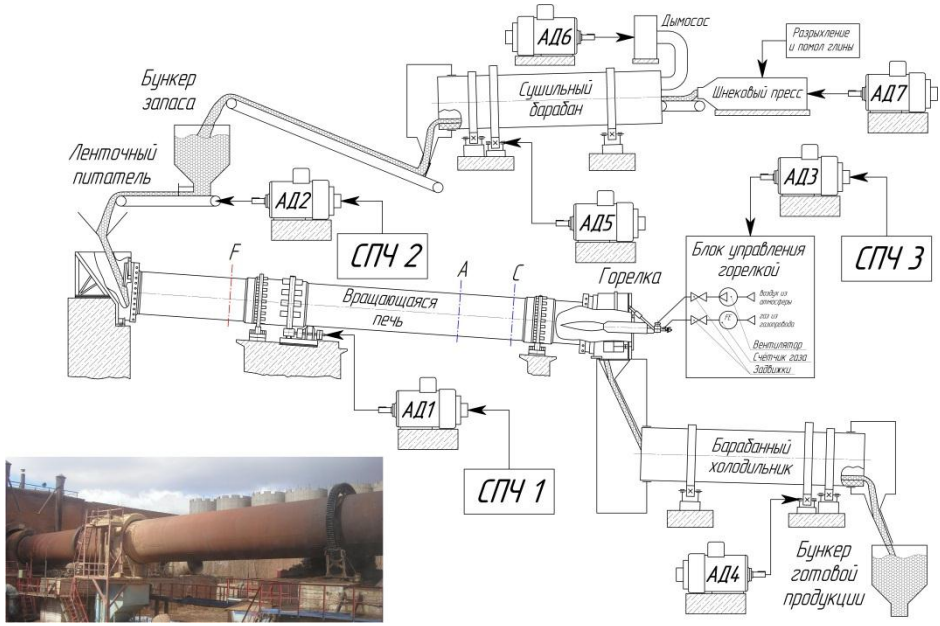

Рисунок 1 – Технологический комплекс производства керамзита

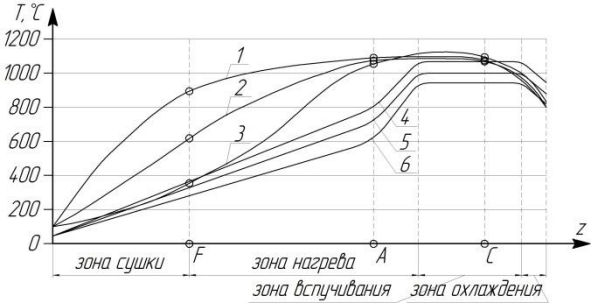

Рисунок 2 – Семейство кривых обжига керамзита:
1-3 – прочного конструкционного;
4-6 – лёгкого теплоизоляционного

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.

Для расширения области управляемости процесса обжига и получения керамзита с требуемой прочностью R была произведена модернизация известной математической модели обжига лёгкого керамзита, имеющая сечения в точках A и C, которая позволила выявить ещё одно характерное сечение печи с координатой Z_F (сечение F) (рис.1, 2).

Определены задачи исследования, которые включают разработку требований к системе автоматического управления вращающейся печью для обжига керамзита, создание математической модели процесса обжига керамзита как объекта управления, синтез системы автоматического управления вращающейся печью с согласованным управлением $\omega_п$, $q_з$, $Q_г$, разработку методик инженерного проектирования многомерной системы автоматического управления вращающейся печью и проведение численного моделирования объекта и системы управления.

Во второй главе описывается математическая модель технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи. Этот объект целесообразно представить совокупностью теплофизических процессов протекающих при обжиге керамзита и электромеханических процессов в исполнительных электроприводах вращающейся печи, ленточного питателя и горелки.

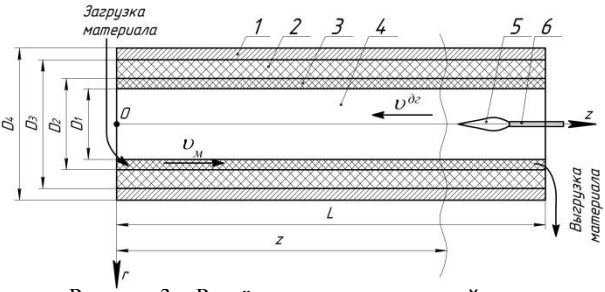

Рисунок 3 – Расчётная схема вращающейся печи

Состояние объекта управления определяется вектором выходных координат $\overline{X} = [T_F, T_A, T_C]^T$, где T_F, T_A, T_C температура в сечениях F, A и C по оси печи соответственно, который, в рамках известных допущений, определяет прочность производимого керамзита.

Вектором управляющих воздействий – $\overline{U} = [\omega_п, q_з, Q_г]^T$ принимаются: скорость $\omega_п$ вращения печи; величина загрузки $q_з$ сырца керамзита, подаваемого в печь (определяется скоростью ленточного питателя), тепловая мощность горелки $Q_г$ (величина которой регулируется приводами устройства управления подачей газа в горелку). Возмущающим воздействием на объект управления являются влажность w сырца керамзита.

При разработке математической модели объекта управления введён ряд основных допущений.

1. 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 перекатывание 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. 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 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 на всей длине печи при ($\omega_п$ = const) и не влияет на температуру газового потока.

Для исследования объекта управления создана расчётная схема (рис. 3) вращающейся печи в виде трёхслойного цилиндра, состоящего из стального корпуса, огнеупорного кирпича и сырца керамзита, равномерно распределённого по внутренней поверхности футеровки.

Разработано математическое описание и схема граничных условий (рис. 4) технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи как объекта управления с распределёнными параметрами. Оно включает в себя модель термодинамики газовой среды (дымовых газов) и теплопередачи в твёрдом теле (слоями вращающейся печи и керамзитом) (1), а также модели исполнительных двигателей электроприводов вращающейся печи, ленточного питателя и горелки.

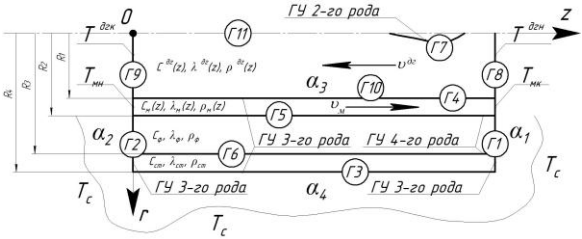

Рисунок 4 – Схема граничных условий

$$
\left.
\begin{aligned}
&\frac{\partial \upsilon_r^{дг}}{\partial \tau} + \upsilon_r^{дг}\frac{\partial \upsilon_r^{дг}}{\partial r} + \upsilon_z^{дг}\frac{\partial \upsilon_r^{дг}}{\partial z} + \frac{1}{\rho^{дг}}\cdot\frac{\partial p^{дг}}{\partial r} = -b\upsilon_z^{дг} + \\
&+\frac{\mu^{дг}}{\rho^{дг}}\left(\frac{\partial^2 \upsilon_r^{дг}}{\partial r^2} + \frac{3}{4}\cdot\frac{\partial^2 \upsilon_z^{дг}}{\partial z^2} + \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial \upsilon_r^{дг}}{\partial r} - \frac{\upsilon_r^{дг}}{r^2} + \frac{1}{4}\cdot\frac{\partial^2 \upsilon_z^{дг}}{\partial r\partial z}\right), \\
&\frac{\partial \upsilon_z^{дг}}{\partial \tau} + \upsilon_r^{дг}\frac{\partial \upsilon_z^{дг}}{\partial r} + \upsilon_z^{дг}\frac{\partial \upsilon_z^{дг}}{\partial z} + \frac{1}{\rho^{дг}}\cdot\frac{\partial p^{дг}}{\partial z} = b\upsilon_r^{дг} - g + \\
&+\frac{\mu^{дг}}{\rho^{дг}}\left(\frac{3}{4}\cdot\frac{\partial^2 \upsilon_z^{дг}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \upsilon_z^{дг}}{\partial z^2} + \frac{3}{4r}\cdot\frac{\partial \upsilon_z^{дг}}{\partial r} + \frac{1}{4}\cdot\frac{\partial^2 \upsilon_r^{дг}}{\partial r\partial z} + \frac{1}{4r}\cdot\frac{\partial \upsilon_r^{дг}}{\partial z}\right), \\
&\frac{\partial \rho^{дг}}{\partial \tau} + \upsilon_r^{дг}\frac{\partial \rho^{дг}}{\partial r} + \upsilon_z^{дг}\frac{\partial \rho^{дг}}{\partial z} + \rho^{дг}\left(\frac{\partial \upsilon_r^{дг}}{\partial r} + \frac{\upsilon_r^{дг}}{r} + \frac{\partial \upsilon_z^{дг}}{\partial z}\right) = 0, \\
&\frac{\partial T^{дг}}{\partial \tau} + \upsilon_r^{дг}\frac{\partial T^{дг}}{\partial r} + \upsilon_z^{дг}\frac{\partial T^{дг}}{\partial z} + T^{дг}\left(\frac{\partial \upsilon_r^{дг}}{\partial r} + \frac{\upsilon_r^{дг}}{r} + \frac{\partial \upsilon_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 \upsilon_r^{дг}}{\partial r} - \frac{\upsilon_r^{дг}}{r}\right)^2 + \left(\frac{\partial \upsilon_r^{дг}}{\partial r} - \frac{\partial \upsilon_z^{дг}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\upsilon_r^{дг}}{r} - \frac{\partial \upsilon_z^{дг}}{\partial z}\right)^2 + \frac{3}{2}\left(\frac{\partial \upsilon_r^{дг}}{\partial z} + \frac{\partial \upsilon_z^{дг}}{\partial r}\right)^2\right] + Q_г(\tau). \\
&p^{дг} - \rho^{дг} R T^{дг} = 0, \\
&\mu^{дг} = f\left(T^{дг}\right), \\
&\frac{\partial T_м(z,r,\tau,w)}{\partial \tau} = a_м(z)\left(\frac{\partial^2 T_м(z,r,\tau,w)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_м(z,r,\tau,w)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_м(z,r,\tau,w)}{\partial z^2}\right) - \upsilon_м\frac{\partial T_м(z,r,\tau,w)}{\partial z}, \\
&\frac{\partial T_ф(z,r,\tau)}{\partial \tau} = a_ф\left(\frac{\partial^2 T_ф(z,r,\tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_ф(z,r,\tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_ф(z,r,\tau)}{\partial z^2}\right), \\
&\frac{\partial T_{ст}(z,r,\tau)}{\partial \tau} = a_{ст}\left(\frac{\partial^2 T_{ст}(z,r,\tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_{ст}(z,r,\tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{ст}(z,r,\tau)}{\partial z^2}\right).
\end{aligned}
\right\} \quad (1)
$$

где b и g – составляющие векторов ускорения силы тяжести и Кориолиса соответственно; $p^{дг}, c_p^{дг}, \rho^{дг}, \lambda^{дг}$ — давление, теплоёмкость при постоянном давлении, плотность и теплопроводность дымовых газов соответственно, $\upsilon_м = f(\omega_п)$ линейная скорость материала (сырца керамзита).

При определении начальных условий рассматривался начальный момент вывода печи на технологический процесс обжига (2).

$$
\left.
\begin{aligned}
&\upsilon_z^{дг}(z,0) = 0, \\
&\upsilon_r^{дг}(r,0) = 0, r \in [0; R_1] \\
&T^{дг}(z,r,0) = T_{ср}, r \in [0; R_1] \\
&\rho^{дг}(z,r,0) = \rho_0^{дг}, r \in [0; R_1], \\
&T_м(z,r,0) = T_{ср}, r \in [R_1; R_2], \\
&T_ф(z,r,0) = T_{ср}, r \in [R_2; R_3], \\
&T_{ст}(z,r,0) = T_{ср}, r \in [R_3; R_4].
\end{aligned}
\right\} \quad (2)
$$

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 $\rho^{дг}$, начальной плотности при нормальных условиях; 5-ое–7-ое уравнения показывают соответствие температур материала $T_м$, футеровки $T_ф$ и стального корпуса печи $T_{ст}$ – температуре окружающей среды T_c.

Граничные условия:

$$
\left.
\begin{aligned}
&(Г1)\begin{cases}
\lambda_ф \dfrac{\partial T_ф(L,r,\tau)}{\partial z} = \alpha_1\left(T_c(\tau) - T_ф(L,r,\tau)\right), r \in [R_2;R_3],\\
\lambda_{ст} \dfrac{\partial T_{ст}(L,r,\tau)}{\partial z} = \alpha_1\left(T_c(\tau) - T_{ст}(L,r,\tau)\right), r \in [R_3;R_4],\\
\lambda_м \dfrac{\partial T_м(L,r,\tau)}{\partial z} = \alpha_1\left(T_c(\tau) - T_м(L,r,\tau)\right), r \in [R_1;R_2],
\end{cases}\\
&(Г2)\begin{cases}
\lambda_ф \dfrac{\partial T_ф(0,r,\tau)}{\partial z} = \alpha_2\left(T_c(\tau) - T_ф(0,r,\tau)\right), r \in [R_2;R_3],\\
\lambda_{ст} \dfrac{\partial T_{ст}(0,r,\tau)}{\partial z} = \alpha_2\left(T_c(\tau) - T_{ст}(0,r,\tau)\right), r \in [R_3;R_4],\\
\lambda_м \dfrac{\partial T_м(0,r,\tau)}{\partial z} = \alpha_2\left(T_c(\tau) - T_м(0,r,\tau)\right), r \in [R_1;R_2],
\end{cases}\\
&(Г3)\ \lambda_{ст} \frac{\partial T_{ст}(z,R_4,\tau)}{\partial r} = \alpha_4\left(T_c(z,R_4 - \Delta R,\tau) - T_{ст}(z,R_4,\tau)\right),\ z \in [0;L],\\
&(Г4)\ \lambda_м \frac{\partial T_м(z,R_1,\tau)}{\partial z} = \alpha_{3.конв.}\left(T_{дг}(z,R_1 - \Delta R,\tau) - T_м(z,R_1,\tau)\right) +\\
&\quad + \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{дг} \cdot \varepsilon_м\left(T^4_{дг}(z,R_1 - \Delta R,\tau) - T^4_м(z,R_1,\tau)\right)}{T_{дг}(z,R_1 - \Delta R,\tau) - T_м(z,R_1,\tau)},\ z \in [0;L],\\
&(Г5)\ \lambda_ф \frac{\partial T_ф(z,R_2,\tau)}{\partial r} = \lambda_м \frac{\partial T_м(z,R_2,\tau)}{\partial r},\ z \in [0;L],\\
&(Г6)\ \lambda_{ст} \frac{\partial T_{ст}(z,R_3,\tau)}{\partial r} = \lambda_ф \frac{\partial T_ф(z,R_3,\tau)}{\partial r},\ z \in [0;L],\\
&(Г7)\ Q_г(\tau) = Q_г(z_г,r,\tau)\big|_{r=0},\ z_г \in [2;8м],\\
&(Г8)\begin{cases}
\upsilon_z^{дг}(z,r,\tau)\big|_{z=L} = 0,\ r \in [0;R_1],\\
\upsilon_r^{дг}(z,r,\tau)\big|_{z=L} = 0,\ r \in [0;R_1],\\
p^{дг}(z,r)\big|_{z=L} = p_a,\ r \in [0;R_1],\\
T^{дг}(z,r,\tau)\big|_{z=L} = T_{ср}, r \in [0;R_1],
\end{cases}\\
&(Г9)\begin{cases}
\upsilon_z^{дг}(z,r)\big|_{z=0} = \dfrac{Q_{дс}}{\pi \cdot R_1^{\ 2}},\ r \in [0;R_1],\\
\dfrac{\partial \upsilon_r^{дг}(z,r,\tau)}{\partial r}\Big|_{z=0} = 0,\ r \in [0;R_1],\\
\dfrac{\partial T^{дг}(z,r,\tau)}{\partial z}\Big|_{z=0} = \dfrac{\partial T^{дг}(z,r,\tau)}{\partial r}\Big|_{z=0} = 0,\ r \in [0;R_1],
\end{cases}\\
&(Г10)\begin{cases}
\upsilon_z^{дг}(z,r,\tau)\big|_{r=R_1} = 0,\ z \in [0;L],\\
\upsilon_r^{дг}(z,r,\tau)\big|_{r=R_1} = 0,\ z \in [0;L],\\
\dfrac{\partial p^{дг}(z,r,\tau)}{\partial r}\Big|_{r=R_1} = 0,\ z \in [0;L],
\end{cases}\\
&(Г11)\begin{cases}
\upsilon_r^{дг}(z,r,\tau)\big|_{r=0} = 0,\ z \in [0;L],\\
\dfrac{\partial \upsilon_z^{дг}(z,r,\tau)}{\partial r}\Big|_{r=0} = 0,\ z \in [0;L].
\end{cases}
\end{aligned}
\right\}
\qquad (3)
$$

В системе (3) 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 $\lambda_{ст}$, $\lambda_ф$, $\lambda_м$. 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 $\lambda_м$ $z \in [0;L]$. Границы Г5, Г6 образуются между поверхностями материала и футеровки $\lambda_м$, $\lambda_ф$ и поверхностями футеровки и внутренней стенки корпуса $\lambda_ф$, $\lambda_{ст}$, соответственно. Граница Г7 разделяет источник тепла и дымовые газы. Границы Г8 и Г9 описывают величины давления $p^{дг}$, температуры $T^{дг}$ и скорости $\upsilon^{дг}$ (через расход) дымовых газов на холодном и горячем торцах вращающейся печи соответственно. Составляющая скорости $\upsilon_r^{дг}$ на границе Г10 показывает непроницаемость поверхности для газа, а $\upsilon_z^{дг}$ 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 $\upsilon_z^{дг}$. В системе (3) σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\varepsilon_{дг}$ – степень черноты дымовых газов, $\varepsilon_м$ – степень черноты обжигаемого керамзита; T_c – температура окружающей среды; R_1, R_2, R_3, R_4, ΔR – радиусы границ раздела сред и материалов слоёв печи, и толщина пограничного слоя между ними соответственно; α_1, α_2, α_3, α_4 – коэффициенты теплоотдачи от твердой поверхности к газовой среде; $\lambda_м$, $\lambda_ф$, $\lambda_{ст}$ – коэффициенты теплопроводности; $\rho_м$, $\rho_ф$, $\rho_{ст}$ – плотности обжигаемого материала, футеровки и стального корпуса печи, соответственно; $Q_{дс}$ – расход дымососа; p_a – атмосферное давление.

Для выявления связи совокупности значений T_F, T_A, T_C с прочностью R получаемого керамзита определены на основании известных результатов экспериментов С.П. Онацкого по обжигу керамзита графоаналитические зависимости R от соответствующих значений T_F, T_A, T_C. Показана целесообразность отображения прочностной характеристики керамзита в трёхмерном ортогональном пространстве $OT_FT_AT_C$ в виде температурно-прочностной характеристики (ТПХ) (рис. 5). Разработана методика построения ТПХ на основании анализа опытных кривых обжига или результатов численного моделирования.

Синтезирована структура математической многомерной модели с сосредоточенными параметрами вращающейся печи, где выходными координатами является температура керамзита в трёх характерных сечениях печи F, A и C. Математическая модель проблемно ориентирована на синтез системы автоматического управления вращающейся печью для обжига керамзита по заданным значениям прочности R.

В результате численного решения, полученной в дискретной форме системы уравнений (1) в программной среде SolidWorks применительно к вращающейся печи 2,5×40м, в которой осуществлялся обжиг глины бескудниковского месторождения, получен статический режим распределения теплового поля сырца керамзита по длине вращающейся печи (рис. 6).

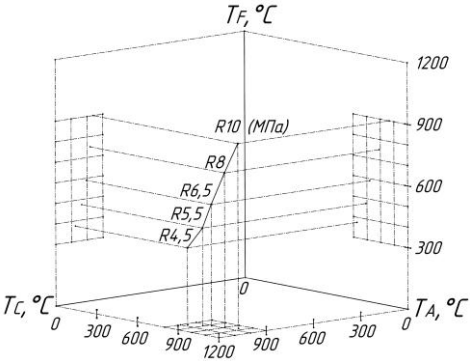

Рисунок 5 – Температурно-прочностная характеристика обжига керамзита

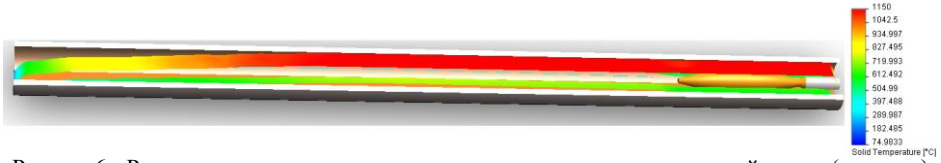

Рисунок 6 – Распределение температуры сырца керамзита по длине вращающейся печи (в разрезе)

По результатам численного моделирования получен массив данных температурного поля печи, как в переходных, так и в установившихся режимах. Показано (путём сравнения кривых обжига, полученных при проведении численного моделирования, с результатами натурных исследований, выполненных С.П. Онацким), что модель адекватно описывает изменение температур во вращающейся печи по отношению к управляющим воздействиям: мощность горелки $Q_г$, загрузка сырца керамзита $q_з$, скорость вращения печи $\omega_п$ и возмущению – влажность сырца w. Величина среднеквадратичного отклонения не превысила 5%.

Для аппроксимации объекта с распределёнными параметрами многомерной структурой с сосредоточенными параметрами удобной для синтеза САУ обжигом керамзита в опорных сечениях F, A и C из найденного массива сделана выборка изменения во времени температуры при ступенчатом воздействий «в большом» и «в малом». Обработка этих временных зависимостей позволила сделать вывод, что математические модели операторов многомерного объекта управления (рис. 7) можно представить в форме передаточных функций. Здесь 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.

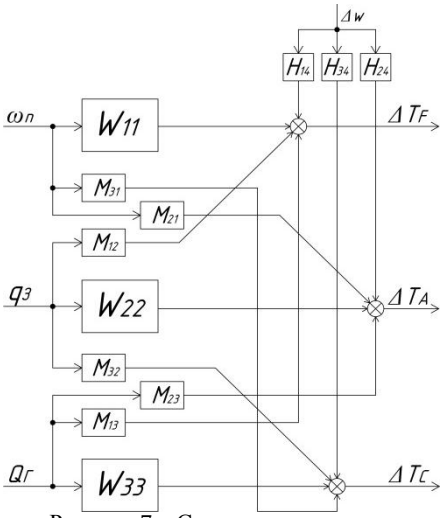

Рисунок 7 – Структурная схема многомерного объекта управления

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

Сравнение переходных характеристик (рис. 10), полученных на модели решаемой в SolidWorks, с переходными характеристиками типовых звеньев сепаратных каналов, выполненные в программной среде MATLAB показывает, что эти характеристики отличаются не более, чем на 5%.

В третьей главе сформулированы требования к многомерной системе автоматического управления (МСАУ) технологическим процессом обжига керамзита (ТПОК), заключающиеся в синтезе структуры МСАУ ТПОК, обеспечивающей создание в печи желаемого температурного поля в условиях технологических ограничений, вызванных конструкцией печи, и при действии помех и возмущающих воздействий на процесс обжига, с отклонением температуры ±5ºС в сечениях F, A и C от заданного значения.

Разработаны требования и задачи формирователя вектора задающих сигналов, заключающиеся в определении координат в построенных пространственных областях – параллелепипедах, в трёхмерном пространстве $OT_FT_AT_C$ (рис. 8), 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 $П_i$ требуемой прочности с экономичным расходом энергоресурсов.

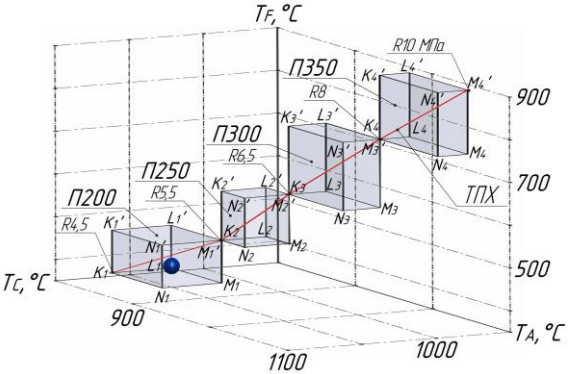

Рисунок 8 – Марки керамзита по прочности в пространстве $OT_FT_AT_C$

Осуществлён структурный синтез многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита (рис. 9) за счёт автоматического согласованного управления $\omega_п$, $q_з$, $Q_г$, с целью получения и стабилизации требуемой прочности керамзита. Многомерная система содержит три канала, каждый из которых структурно построен в виде многоконтурной системы с одной измеряемой координатой (МСОИК). Такой подход, как показано далее обеспечивает робастность системы в условиях нестационарности объекта управления.

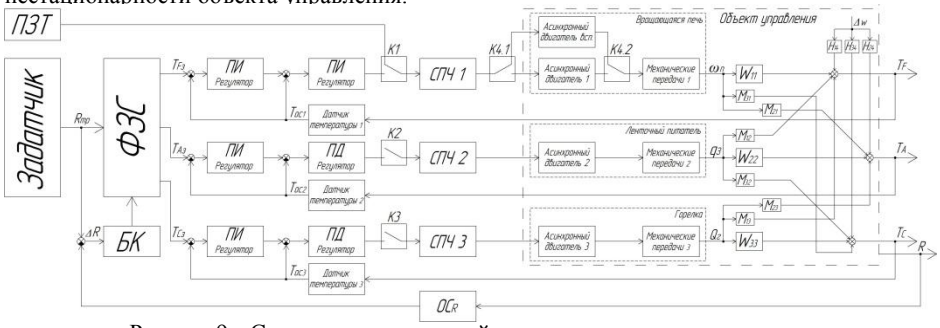

Рисунок 9 – Структура многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита

Выполненные исследования каналов МСАУ ТПОК с использованием критерия Цыпкина-Поляка и критерия Найквиста показали, что синтезированная система устойчива и в ней обеспечивается робастность при параметрической неопределенности объекта управления. Установлено, что влияние межканальных связей в объекте оказывает положительный эффект на сепаратные каналы управления, при этом оно отрабатывается этими сепаратными каналами МСАУ ТПОК за время 500÷2500с с величиной динамического выброса $\gamma = 0{,}95°C \div 8{,}75°C$, что составляет всего 1÷9% по сравнению с величинами управляющих воздействий в сепаратных каналах.

Разработан алгоритм функционирования цифрового задающего устройства формирующего вектор задающих сигналов $\overline{X}_y = [T_{Fз}, T_{Aз}, T_{Cз}]^T$, который позволяет накапливать массив данных о требуемых сочетаниях прочности R и насыпной плотности ρ. После накопления данных корректируются температуры $T_{Fз}$, $T_{Aз}$, $T_{Cз}$, через индивидуальный показатель конкретной глины γ_i, который в основном определяется химическим составом глины. В результате корректировки значений трёх задаваемых температур $T_{Fз}$ – в конце зоны сушки, $T_{Aз}$ – в конце зоны нагрева, $T_{Cз}$ – в середине зоны вспучивания 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 отличающегося от заданной марки.

Использование построенной МСАУ ТПОК позволяет производить керамзит требуемой марки по прочности (в рамках известных технологических ограничений) с экономией энергоресурсов, исключая влияние человеческого фактора, присущее автоматизированному управлению, состоящего в затратах времени на принятие решения технологом об изменении величины управляющего воздействия вследствие чего увеличивается брак в виде получения керамзита не соответствующей марки.

В четвёртой главе представлены разработанные методики для численного математического моделирования динамических характеристик технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи при действии трёх управляющих воздействий, как на объект управления, так и на систему управления ТПОК. Они базируются на моделировании вращающейся печи как объекта управления с распределёнными параметрами в программной среде SolidWorks с получением статических и динамических характеристик, последующей их идентификацией в программной среде MATLAB и аппроксимацией соответствующими передаточными функциями и проведением численного моделирования (рис. 10). На рис. 10 показано изменение температуры T_F в сечении F от влияния управляющих и возмущающих воздействий, 1 – SolidWorks, 2 – MATLAB.

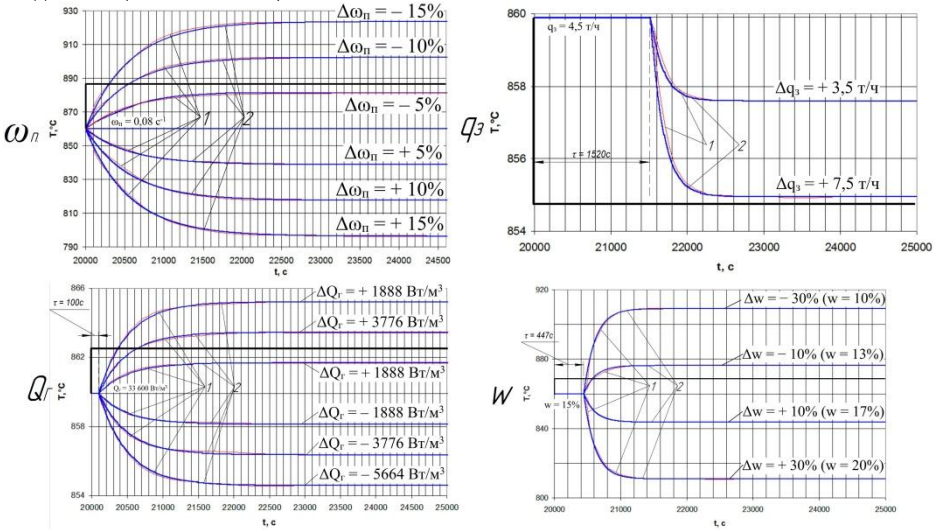

Рисунок 10 – Результаты численного моделирования объекта управления

В программной среде MATLAB создана вычислительная модель объекта управления с сосредоточенными параметрами в виде многомерной структуры, собственные операторы и операторы перекрёстных связей которой представлены передаточными функциями. По результатам исследований объекта управления разработаны модели собственных каналов и перекрестных связей многомерной структуры объекта. В программной среде MATLAB построена вычислительная модель многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита. Выполнена настройка регуляторов МСАУ ТПОК. В канале стабилизации температуры в сечении F использована методика настройки МСОИК, а именно в первом и во втором контурах системы выбраны ПИ регуляторы для обеспечения астатичности, монотонного характера кривой переходного процесса и повышения быстродействия.

Каналы стабилизации температуры в сечениях A и C содержат звенья запаздывания, поэтому, с использованием основных подходов синтеза МСОИК, производится настройка

регуляторов этих систем, численным методом с использованием частотных характеристик в программной среде MATLAB. При этом с целью упрощения технической реализации цифрового регулятора ограничимся двумя контурами.

В канале А, где запаздывание достигает 2600с, в первом контуре для увеличения быстродействия применён ПД-регулятор, при этом пропорциональная составляющая регулятора выбрана так, чтобы обеспечить необходимый запас устойчивости в условиях неопределённости параметров объекта в соответствии с критерием Найквиста. Во втором контуре выбран ПИ-регулятор, для устранения статической ошибки. Так как в канале А существенно изменяются параметры объекта управления, настройка осуществлялась по крайним значениям коэффициента передачи, запаздывания и постоянной времени, чтобы обеспечить минимально возможное время переходного процесса при одинаковой настройке регуляторов.

В канале стабилизации температуры в сечении С содержится интегрирующее звено, поэтому в первом контуре применён ПД-регулятор, который 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, для устранения статической ошибки.

Предложен вариант технической реализации МСАУ ТПОК (рис. 11), 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.

Результаты численного моделирования по управлению переводом печи с одной кривой обжига на другую показали, что использование в разработанной МСАУ ТПОК алгоритма формирования вектора задающих сигналов позволяет обеспечить синхронный переход температурного режима по всей длине печи, причём сигнал в каналах F и C 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 А. Например время перехода производства керамзита с марки П200 (по прочности) на марку П250 составляет $t_{п.п}$=2420с; с марки П250 на марку П300 – $t_{п.п}$=3600с; с марки П300 на марку П350 – $t_{п.п}$=5210с. Величина динамического провала по возмущению составила γ = 3,7÷5,15°С, что практически не превышает заданных в главе 3 требований об отклонении температуры в пределах ±5°С. При этом статическая ошибка МСАУ ТПОК, в виду применения интегральной составляющей в регуляторах, равна нулю, погрешность на реальной установке будет определяться точностью термопары, которая составляет ±1°С и суммарной погрешностью преобразователя (цифровая погрешность и влияние температуры на цифровой сигнал) ±0,23°С. В результате погрешность составит ±1,23°С, что не превышает предъявляемых требований по точности поддержания температуры ±5°С. Погрешность по прочности составит R = ±0,126 МПа, что не превышает 5%. Полученные результаты показывают эффективность согласованного управления синтезированной МСАУ ТПОК, поскольку опытный оператор при ручном или автоматизированном управлении, ориентируясь визуально на движение керамзита и показания пирометра допускает погрешность ±10,25÷17,75°С, что является критическим, поскольку длительное изменение температуры сырца керамзита на 15°С приводит к существенному изменению насыпной плотности и прочности и, следовательно, к получению керамзитового гравия другой марки (при том, что 2/3 печи с «холодного» конца визуально не просматриваются, 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÷87мин требующегося синтезированной системе автоматического управления.

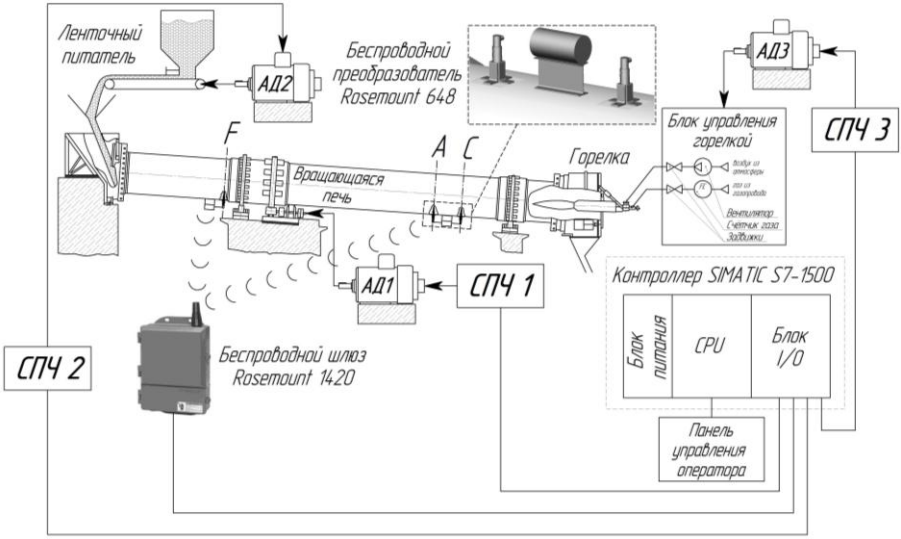

Рисунок 11 – Вариант технической реализации МСАУ ТПОК

Разработана методика инженерного проектирования многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита, позволяющая осуществлять управление сложным объектом с распределёнными параметрами при действии трёх управляющих воздействиях в характерных опорных сечениях. В методике используется алгоритм согласованного управления объёмной тепловой мощностью горелки, загрузкой печи сырцом и приводом вращения печи тремя каналами. Проведён технико-экономический расчёт внедрения многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита, показывающий, что практическое внедрение системы позволит сократить расход газа на 8% при производстве 1м^3 керамзита, срок окупаемости капитальных вложений – 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 $\overline{X} = [T_F, T_A, T_C]^T$, 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 – $\overline{U} = [\omega_п, q_з, Q_г]^T$ приняты: скорость $\omega_п$ вращения печи; величина загрузки $q_з$ сырца керамзита, подаваемого в печь (определяется скоростью ленточного питателя), тепловая мощность горелки $Q_г$ (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 $\omega_п$ они представляют собой апериодические звенья с нестационарными значениями постоянной времени (T_{11} = 290÷550с), и коэффициента передачи K_{11} = (1,25÷5,3)10^3°С/(рад/с). Остальные операторы многомерного объекта описаны последовательным соединением апериодического звена и звена запаздывания. Параметры звеньев операторов по отношению к объёмной мощности $Q_г$ стационарны (T_{33} = 300с, τ_{33} = 150с, K_{33} = $32\cdot10^{-3}$ °С/(Вт/м^3), а операторов по отношению к загрузке $q_з$ – нестационарны (τ_{22} = 1215÷2600с, K_{22} = 24÷48 °С/(т/ч), T_{22} = 165с). Показано, что модель адекватно описывает изменение температур во вращающейся печи, по отношению к управляющим воздействиям: мощность горелки $Q_г$, загрузка сырца керамзита $q_з$, скорость вращения печи $\omega_п$ 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 ±5°С. Установлена связь прочности R в трёхмерном пространстве с координатами T_F, T_A, T_C. Введено понятие температурно-прочностой характеристики, такой подход позволяет формировать вектор задающих воздействий для САУ обжигом керамзита $\overline{X}_з = [T_{Fi}, T_{Ai}, T_{Ci}]^T$.

3. Осуществлён структурный синтез многомерной системы автоматического управления технологическим процессом обжига керамзита (МСАУ ТПОК) за счёт автоматического согласованного управления скоростью $\omega_п$, загрузкой $q_з$ и объёмной тепловой мощностью $Q_г$, Выполнена настройки регуляторов сепаратных каналов по критерию обеспечения робасности, 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 A и C 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 ±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 1м^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».

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. 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

2. 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

3. 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

4. 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

5. 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

публикации в международных журналах,
индексируемых в Web of Science и SCOPUS

6. 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

7. 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

8. 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

9. 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.

публикации в сборниках статей и материалах конференций

10. 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

11. 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

12. **Самохвалов О.В.** Алгоритм цифрового задающего устройства многомерной САУ обжигом керамзита с требуемыми показателями качества // Подъёмно-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

13. **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

14. **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

15. **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

16. **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.

17. 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

18. 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

19. **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

20. 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

21. 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

22. **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

23. **Самохвалов О.В.** 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. – С. 831 – 832

24. **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

25. **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

полученные объекты интеллектуальной собственности

26. 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

Разрешено к печати диссертационным советом Д 212.217.07
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Протокол № 5 от 21 сентября 2018 г.
Заказ № 522. Формат 60x84 1/16. Бумага тип. №1.
Отпечатано на ризографе. уч.-изд. л. 1,15. Тираж 120 экз.
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной печати
443100, г. Самара, Молодогвардейская ул. 244, Главный корпус