

На правах рукописи



Сантос Куннихан Марио Рохелио

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ
ОБЪЕМНОГО ДОЗИРОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МОЛОТОГО
ОБЖАРЕННОГО КОФЕ**

Специальности: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) Министерства образования и науки Российской Федерации «Московский государственный университет пищевых производств» на кафедре «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами»

- Научный Руководитель: **Маргарита Михайловна Благовещенская**
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ
- Официальные оппоненты: **Юрий Николаевич Матвеев**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Тверской государственный технический
университет»
Сергей Игоревич Апанасенко
кандидат технических наук, ООО «Омрон
Электроникс»
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Калининградский
государственный
технический университет»

Защита состоится 26 декабря 2017 года в 11 час, на заседании диссертационного Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д.212.148.02 при ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств» по адресу: 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д.33, 2-ой этаж, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств»

С авторефератом можно ознакомиться на сайтах ВАК РФ Министерства образования и науки РФ <http://vak.ed.gov.ru> и ФГБОУ ВО «Московский государственный университет пищевых производств» <http://mgupr.ru>.

Автореферат диссертации разослан «11» ноября 2017г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н., проф.

Митин В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современных техногенных условиях жизни и при больших эмоциональных и стрессовых нагрузках у населения Российской Федерации возникает все большая потребность в качественных и полезных для организма продуктах питания. Одной из важнейших технологических операций в ходе приемки, хранения и переработки кофе при производстве молотого обжаренного кофе, является дозирование.

Дозирование молотого кофе является важнейшей задачей в пищевой промышленности. Кроме того, в различных отраслях промышленности весьма актуальной является проблема стабильной и корректной подачи продукта в дозирующий механизм. С помощью объемных дозаторов измеряют массу дозируемого молотого кофе по его объему. Но при процессе дозирования возникают проблемы со стабильностью подачи молотого кофе в дозирующий механизм и возможностью контроля образующихся при этом сводов. В связи с этим проблема традиционного объемного способа дозирования молотого кофе заключается в использовании устаревших методов и систем преобразования управляющих сигналов контроллеров в управляющие воздействия в виде переменного количества молотого кофе. Особая проблема возникает при дозировании молотого кофе разных по частицам фракций. При заданной плотности молотого кофе на этапе его автоматического дозирования в упаковку возникают трудности равномерного распределения частиц по объему и форме упаковки, если кофе отличается разными размерами частиц фракций. Также недостаточно теоретических и экспериментальных исследований по физико-механическим свойствам молотого кофе, автоматизации контроля его показателей качества.

Применение автоматических объемных роторных дозаторов в качестве объектов автоматизации и создание на их основе - систем автоматического регулирования параметров технологических процессов производства молотого обжаренного кофе с использованием интеллектуальных технологий позволяет решить данную проблему. В этой связи представляется необходимым исследование и анализ объекта автоматизации, существующих и необходимых методов контроля показателей качества исследуемой продукции и разработка на основе полученных результатов системы управления процессам объемного дозирования молотого обжаренного кофе с учетом определения в потоке физико-механических свойств.

Контроль процесса объемного дозирования производства кофе имеет большое значение, так как от него зависит стабильность качественных

характеристик продукта. Поэтому тема настоящей диссертационной работы, направленной на решение этих вопросов, актуальна. Она позволяет решить задачи, связанные с решением проблемы создания автоматизированной системы контроля в потоке основных показателей качества молотого кофе с помощью разработанных методов и математических моделей, адекватно отражающих, происходящие в аппаратах роторных дозаторов процессы дозирования сыпучих материалов. Такие разработки повысят эффективность работы аппарата, позволят разработать новые перспективные конструкции этих аппаратов, разработать системы мониторинга процессов дозирования сыпучих материалов с использованием современных интеллектуальных технологий: искусственных нейронных сетей (ИНС) и систем компьютерного зрения (СКЗ). Создание такой системы позволит: непрерывно, в потоке контролировать эффективность процесса дозирования молотого кофе, а также непрерывно определять основные показатели его качества в течение всего технологического процесса; что обеспечит стабильность производства кофе; существенно уменьшит уровень брака, снизит потери рабочего времени, сырья и энергии, повысит качество готовой продукции.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР ФГБОУ ВО МГУПП по направлению «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами пищевой промышленности».

Цель работы.

Целью диссертационной работы является развитие и совершенствование методов автоматизации и алгоритмов управления процессами дозирования молотого кофе с учетом показателей их качества.

Цель достигается за счет снижения разброса дисперсности частиц кофе по упаковкам в пределах одной партии кофе; за счет обеспечения времени нахождения продукта в технологическом аппарате объемного роторного дозатора, что препятствует возникновению условий влагопоглощения, слеживаемости при образовании застойных зон в объемных дозаторах высушенного, молотого, вакуумированного кофе.

Основные задачи исследования.

В качестве основных задач исследования выделены следующие задачи:

1. Анализ процесса дозирования молотого обжаренного кофе как объекта управления и существующих систем управления процессами дозирования молотого кофе.

2. Исследование показателей качества (дисперсности и формы частиц) молотого кофе сорта «Арабика», разработка и апробация методов и способов автоматического контроля этих показателей с применением интеллектуальных технологий.

3. Проведение экспериментальных исследований и моделирование процесса истечения молотого кофе из бункера по методам дискретных элементов.

4. Разработка математической модели управления процессам дозирования молотого кофе сорта «Арабика» из бункера объемного дозатора с учетом присущих ему внутренних связей между параметрами технологического режима и внешними возмущающими факторами.

5. Моделирование функционирования системы управления приводами подачи и объемного дозатора при действии стохастических возмущений по загрузке дозатора и физико-механических свойств кофе.

6. Разработка алгоритмов управления процессом дозирования, предусматривающих учет корректирующего воздействия по промежуточной координате - уровня молотого кофе в бункере на основе исследования режимов работы дозатора и проверки асимптотической устойчивости системы управления производительностью дозатора при действии случайных возмущений и при отсутствии перерегулирования по уровню молотого кофе в бункере.

7. Создание и апробация функциональной программы имитационного моделирования системы управления процессам дозирования молотого обжаренного кофе сорта «Арабика».

Объектом исследования является объемный стаканчиковый дозатор в линии по производству пищевых продуктов, анализа и обработки пакетированного продукта.

Предметом исследования и разработок являются совокупность теоретических, методологических и практических задач, связанных с созданием программно-аппаратного комплекса автоматизированной системы дозирования пищевых продуктов, а также методы контроля показателей качества молотого обжаренного кофе в процессе дозирования.

Общая методика исследований. Работа основана на теоретических и экспериментальных методах исследования. При разработке математических моделей использовались известные законы механики и динамики, описывающие поведение однородных частиц молотого кофе.

Постановка исследований и производственных испытаний проводилась в соответствии с действующими ГОСТами, методиками планирования и обработки эксперимента. Численная и графическая обработка результатов исследований производилась с применением MatLab, LabVIEW, EDEM.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в пищевой промышленности)», а именно пунктам:

2. Автоматизация контроля и испытаний;

9. Методы эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП и др., включая базы и банки данных и методы их оптимизации;

12. Методы контроля, обеспечения достоверности, защиты и резервирования информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП и другие;

15. Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель процесса истечения молотого кофе сорта «Арабика» из бункера роторного дозатора и методика определения параметров модели.

2. Предложен способ управления производительностью дозатора с учетом корректирующего воздействия по промежуточной координате - уровня продукта в бункере, обеспечивающий постоянное значение отношения общего объема бункера к объему, занимаемому застойными зонами молотого кофе.

3. Доказана возможность обеспечения стабилизации работы дозатора за счет применения на нижнем уровне управления классических линейных законов регулирования по каналам «скорость вращения ротора дозатора – уровень продукта» и «скорость вращения привода загрузки – уровень продукта».

4. Исследованы закономерности разброса размеров и формы частиц молотого кофе сорта «Арабика» с получением примеров 2D и 3D изображений частиц, доказывающие неправомочность применения допущений о правильной геометрической форме частиц при решении задач моделирования и управления дозатором.

5. Разработаны алгоритмы управления процессом дозирования, предусматривающие компенсацию стохастических возмущений по загрузке дозатора и физико-механических свойств кофе.

Практическая значимость и реализация результатов работы

1. Разработана и предложена новая функциональная структурная схема (ФСС) промежуточных операций процесса объемного дозирования МК с указанием необходимых параметров регулирования и контроля, а также структурные связи системы автоматического дозирования (САД) пищевых продуктов с включением в нее интеллектуальных датчиков контроля уровня в бункере хранения объемного дозатора.

2. Разработана структура нейронной сети, типа многослойный персептрон с одним скрытым слоем – ПИД контроллером как нейросетевой

оптимизатор (НСО) с интеллектуальными модулями контроля показателей качества молотого кофе и управления процессом дозирования пищевых продуктов.

3. На основе структурно - параметрического моделирования разработана математическая имитационная модель управления процессом объемного дозирования пищевых продуктов предусматривающая учет корректирующего воздействия по промежуточной координате и скоростей приводов, используя эффективности ПИ законов регулирования и нейросетевого оптимизатора ПИ контроллера.

4. Разработан программно-аппаратный комплекс для управления процессом дозирования пищевых продуктов в среде разработки программного обеспечения NI LabVIEW.

Апробация работы. Основные результаты работы и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: XXVII Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-27) Тамбов 2014г; XXVI Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-26) Вологда 2014г; Научно-практической конференции «Актуальные проблемы автоматизации и управления» Челябинск 2013г; XXVI Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-26) Нижний Новгород 2013г; Международная научно-практическая конференция «Автоматизация и управление технологическими и бизнес – процессами пищевой промышленности», 21– 23 ноября 2016 г., МГУПП; Научная конференция с международным участием «Развитие пищевой и перерабатывающей промышленности России: кадры и наука», 11– 12 апреля 2017 г., МГУПП; Международная научно-практическая конференция «Академическая наука - проблемы и достижения», 15 – 16 мая 2017, North Charleston, USA. Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики», 15 – 16 октября 2017, Москва. Общеуниверситетская студенческая конференция студентов и молодых ученых «День науки» Сборник материалов конференции, апрель 2017, Москва.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 19 научных работ, в том числе 3 статьи опубликованы в научных журналах, входящих в перечень ВАК Российской Федерации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов работы и выводов, списка сокращенных слов, списка литературы и приложения; включает 61 рисунок, 10 таблиц. Основной текст изложен на 156 страницах. Библиографический список включает 188 наименования, из них 35 на иностранном языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, дано описание содержания работы, представлены выносимые на защиту основные положения, отражены научная новизна полученных результатов и их практическая значимость.

В первой главе описаны характеристики кофе, детали его обработки, характеристика основных стадий и сопутствующие проблемы при производстве молотого обжаренного кофе (МК). Особое внимание уделено объемным дозаторам. Указаны недостатки их работы, которые требуется скорректировать. Проанализирована работа дозаторов порционного и непрерывного типов действия, используемых на сегодняшний день в пищевой промышленности.

Проанализированы дозаторы различных типов и выбран объемный стаканчиковый дозатор как объект автоматизации с формализацией особенностей процесса объемного дозирования. Для упаковки продукта на основании проведенного анализа рассмотрен и выбран вертикальный фасовочно-упаковочный автомат в базовом исполнении. Проведена классификация основных типовых операций в процессе дозирования при производстве МК. Выбраны факторы, определяющие эффективность этих операций.

На основании полученных результатов разработана функционально - структурная схема (ФСС) влияния факторов перерабатываемого сырья, промежуточных операций на качество объемного дозирования МК на рис. 1.

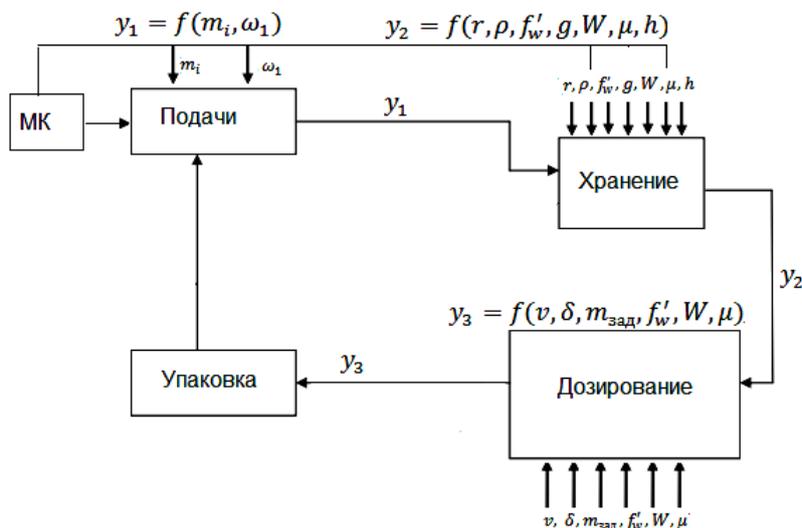


Рис. 1. Функционально-структурная схема влияния факторов промежуточных операций на процесс дозирования молотого кофе

Выбраны и обоснованы наиболее важные органолептические показатели качества и физико-механические свойства молотого кофе (МК), контролируемые и регулируемые параметры в ходе технологического процесса, такие как: промежуточная координата (уровень МК в бункере дозатора),

скорость привода питателя, скорость привода дозатора, коэффициент истечения, плотность, коэффициент сыпучести, скорость истечения МК, погрешность дозатора, заданная масса (объем) МК. Проанализированы методы и средства автоматического контроля в потоке этих показателей. Проведен анализ и выбор современных промышленных контроллеров для управления процессами дозирования. Разработана иерархическая модель структуры системы автоматического дозирования (САД) молотого кофе (рис. 2) с описанием функциональных устройств системы автоматического дозирования, функциональных механизмов и блоков управления, входящих в состав САД, исполнительных механизмов (ИМ) и приводов (Пр), а также датчиков и блоков управления.

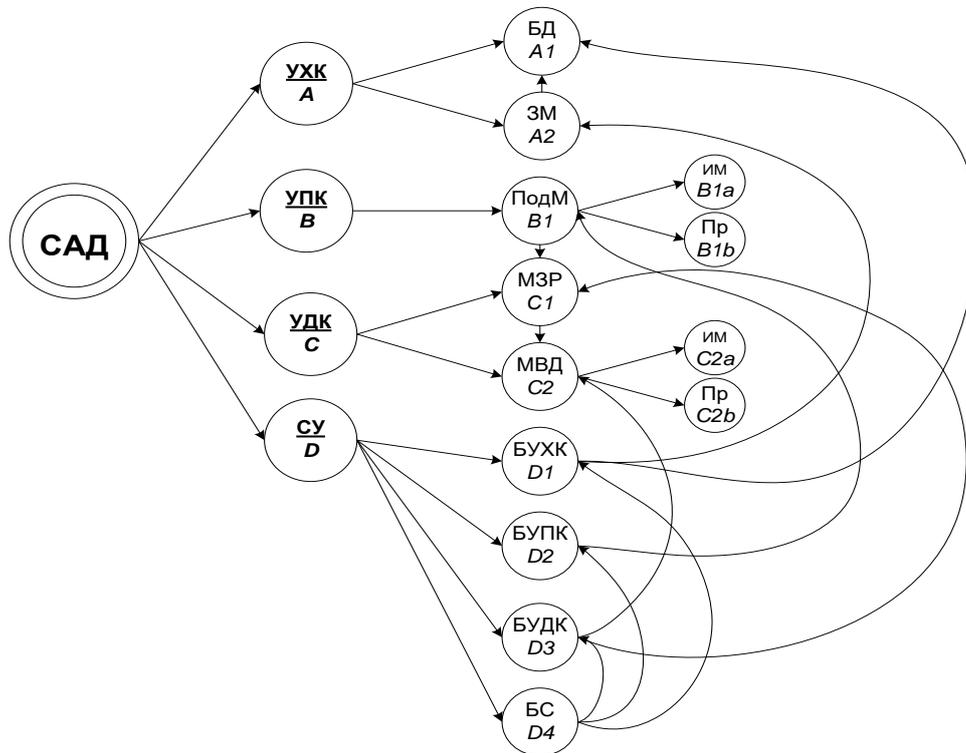


Рис. 2. Иерархическая модель структуры системы автоматического дозирования молотого кофе

Современное программное обеспечение верхнего уровня для работы с приборами рассматриваемого класса не позволяет представлять процесс движения среды в бункере за исключением отображения на мониторе мнемосхемы с имитацией заполнения бункера стаканчикового дозатора. В работе показано, что существующие в настоящее время методы оценки этих показателей качества субъективны и требуют проведения комплекса аналитических и экспериментальных исследований.

Была поставлена задача создания математической модели процесса дозирования молотого кофе с использованием микро-ЭВМ и контроллера, позволяющих компенсировать влияние внешних возмущающих воздействий.

Вторая глава. Во второй главе рассматриваются вопросы поведения молотого кофе в бункере при истечении. Описаны разные подходы к моделированию работы стаканчикового дозатора. Установлены оптимальные параметры конструкции бункера для молотого кофе, предотвращающие сводообразование. Подробно описаны лабораторные методы определения параметров молотого кофе. Анализ существующих моделей процесса дозирования и результаты экспериментов по исследованию формы и размера частиц молотого кофе помогают найти правильный подход к построению и моделированию адекватной модели процесса управления дозированием молотого кофе.

Проведено экспериментальное исследование основных физико-механических свойств МК, оказывающих наибольшее влияние на качество дозирования МК. Доказано, что мелкофракционные частицы МК являются связным материалом, так как сопротивление сдвигу τ_0 больше нуля. Проведенные эксперименты с помощью зондового микроскопа показали, что частицы МК имеют неправильные формы, что показано на рис. 3.

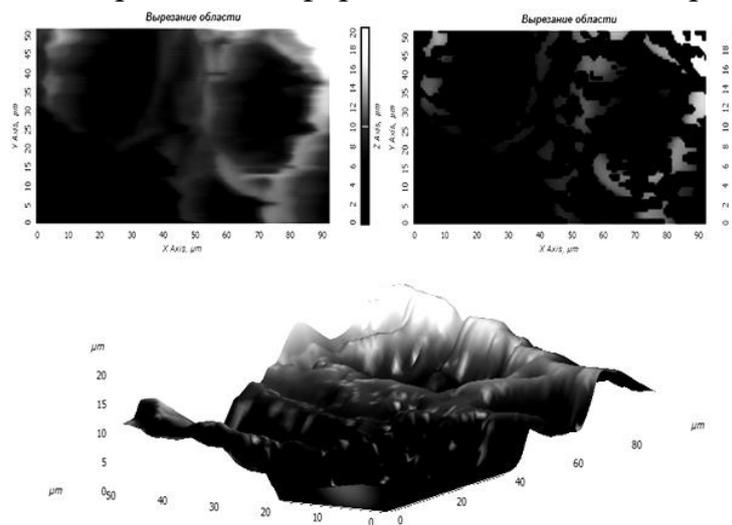


Рис. 3. Способы графического представления молотого кофе

Результаты моделирования процесса истечения молотого кофе из бункера дозатора показывают, что вид истечения молотого кофе отличается от жидкостей наличием коэффициента внутреннего трения, силы сцепления, а также осуществлением напряжения на стене цилиндроконического бункера объемного стаканчикового дозатора, что усложняет описание математической модели процесса истечения молотого кофе в дозирующее устройство.

Полученные экспериментальные данные позволили получить следующее уравнение:

$$\sigma_y = c_w + \sigma_x \tan \beta_w = c_w \sigma_x f'_w \quad (1)$$

где; σ_y – касательное напряжение (напряжение к стене бункера); c_w – коэффициент адгезий молотого кофе к стене бункера; σ_x – нормальное напряжение; β_w – угол трения на стене бункера; f'_w – коэффициент трения.

Предложена модель определения скорости свободного истечения молотого кофе (2) из бункера стаканчикового дозатора с учетом физико-механических свойств молотого кофе и параметров конструкции дозатора, с помощью которой можно выявить параметры бункера, обеспечивающие стабильность истечения молотого кофе без сводообразования и правильно настроить объемный стаканчиковый дозатор для эффективности оценки качества молотого кофе.

$$v_u = Cd \sqrt{2gh(\tan\beta_w) \left[pd - \frac{\tau_0}{\rho} \right]}, [\text{м/с}] \quad (2)$$

Где, v_u – скорость истечения МК, Cd – коэффициент истечения для молотого кофе ($Cd = 0.2 - 0.3$), g – ускорение силы тяжести, τ_0 – сопротивление сдвигу, ρ – плотность МК, p – коэффициент зависимости от формы бункера ($p = 1$ для конической части бункера), d – диаметр отверстия канала истечения; β_w – угол наклона бункера, h – уровень МК в бункере.

Насыпная плотность молотого кофе практически не влияет на численные значения коэффициентов внешнего трения (рис. 4). При увеличении нормального напряжения в зоне сдвига на 15 % коэффициент внутреннего трения увеличивается не более, чем на 2–3 %.

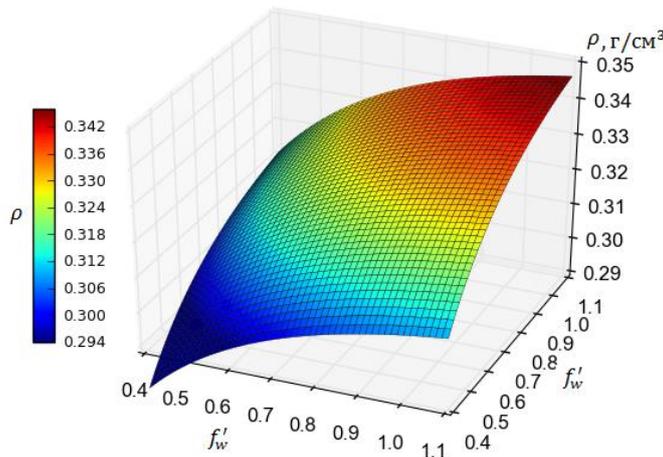


Рис. 4. График поверхности изменения плотности от коэффициента трения частиц молотого кофе

Результаты моделирования дискретных частиц молотого кофе (МК) по методам дискретных элементов (МДЭ), позволили визуализировать моделируемые процессы с использованием систем компьютерного зрения (СКЗ) или 3D-виртуальной реальности для процесса истечения МК, но реальная геометрическая форма частиц МК затрудняла задачи моделирования в процессе

истечения. При этом проведенный анализ показал, что с учетом физико-механических свойств МК и параметров конструкции бункера, на угол внешнего трения МК существенно влияют эффективные значения коэффициентов трения скольжения f_s . Анализ полученных экспериментальных данных показал, что применение эффективных значений коэффициента скольжения, дает возможность моделировать частицы МК с различными гранулометрическим составом и формой частиц МК по методам дискретных элементов.

Результаты экспериментальных и аналитических исследований показали, что коэффициенты напряжения частиц МК калибруются в интервале (0.3 – 0.6 Па), коэффициент истечения разных частиц и сортов кофе (0.1-0.6), плотность МК (300-600 кг/м³), коэффициент сыпучести (Начальное сопротивление сдвигу от 7.16 до 10.22 кг/м²), адекватные параметры для хорошего истечения МК из бункера стаканчикового дозатора составляют бункер с размером выпускного отверстия $d = 0.10$ м и углом наклона $\beta_w = 31.4^\circ$.

В третьей главе с помощью имитационного моделирования на ЭВМ исследована эффективность применения различных законов управления дозами молотого кофе. Обсуждаются модели процесса дозирования молотого кофе, основанные на разных подходах. Модели позволяют учесть случайные возмущения, как со стороны механизмов, так и со стороны самого кофе.

Произведена математическая постановка задачи контроля величины уровня молотого кофе в бункере для процесса управления дозированием молотого кофе, где предлагается введение контура уровня МК, направленной на стабилизацию режима истечения молотого кофе из бункера посредством управления промежуточной координатой.

Первоначально в качестве критерия управления выбирается заданная производительность технологической линии с наложенными на нее ограничениями на колебания массы МК в упаковке.

$$Q = Q_{зад} \pm \Delta Q, \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (m_i - m_{зад})^2} \leq \Pi, \quad (3)$$

где Q – производительность, [упаковок/мин]; $Q_{зад}$ – заданная производительность, [упаковок/мин], ΔQ – допустимые отклонения производительности, N – число выпущенных упаковок (циклов дозирования), Π – заданная погрешность стаканчикового дозатора, [кг], m_i – порция МК, $m_{зад}$ – заданная порции МК.

Уравнение (3), как и представления структуры системы управления также трансформируется в процессе проектирования. При исследовании системы

«дозатор-привод-система управления» методами имитационного моделирования вместо производительности рассматривается расход молотого кофе на входе (q_1) и выходе бункера дозатора (q_2), зависящий от скоростей приводов питателя и дозатора (ω_1 и ω_2).

$$\begin{aligned} \omega_{1зад} &= f1(q_1, q_2), \omega_{2зад} = f2(q_1, q_2), \\ \omega_1 &= F1(e_1), \omega_2 = F2(e_2), e_1 = \omega_1 - \omega_{1зад}, e_2 = \omega_2 - \omega_{2зад}, \\ F3(Q_{зад}) &= \omega_{1зад} - \omega_{2зад}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\omega_{1зад}$, $\omega_{2зад}$ – заданные (расчетные) значения скоростей приводов;

$f1, f2$ – зависимости скоростей приводов питателя и дозатора от расходов молотого кофе на входе и выходе;

e_1, e_2 – рассогласования для локальных регуляторов скоростей приводов питателя и дозатора;

$F1, F2, F3$ – функции преобразования координат.

На рисунке 5 в общем виде представлена структурная технологическая система производства молотого кофе и его упаковки с указанием необходимых параметров контроля.

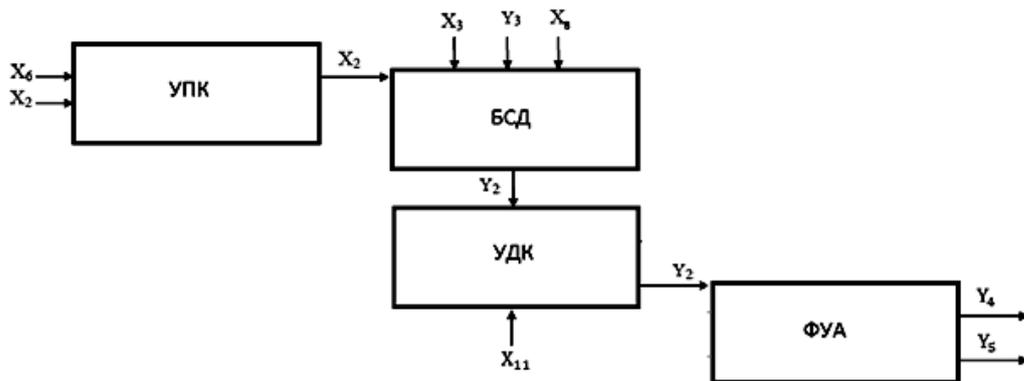


Рис. 5. Структурная технологическая схема производства молотого кофе и его упаковки с учетом выбранных параметров контроля

В устройстве подачи кофе (УПК) контролируются скорость привода подачи МК в бункер X_6 (ω_1) и объем МК в начале процесса X_2 (q_0, q_1).

$$q_0(t) = L \omega_1(t) \rho, \quad (5)$$

где, $q_0(t)$ – Начальное значение расхода МК от времени t ;

L – Параметры конструкции транспортного оборудования питателя (конвейер);

ω_1 – скорость привода питателя;

ρ – плотность МК.

В этом случае интересуют значения расхода q_1 . $q_1 = q_0$.

Бункер стаканчикового дозатора (БСД) заполняется материалом – молотым кофе, где контролируются его уровень $Y3(h)$, коэффициент истечения $X3(Cd)$, плотность МК $X8(\rho)$.

Объем МК в бункере определяется по формуле (6) а уровень МК в бункере по формуле (7).

$$V(t) = DHh(t)\rho \quad (6)$$

где, $V(t)$ – Объем МК от времени t , D – Диаметр бункера (цилиндрической формы), H – высота, h – уровень МК, ρ – плотность МК.

$$h(t) = \frac{1}{DH\rho} \int (q_1(t) - Dq_2(t)) dt \quad (7)$$

В результате $Y2(q_2)$ поступает в устройство дозирования кофе (УДК), в стаканах заданных значений объема порции МК $Y4(q_3)$, где контролируется скорость дозатора $X11(\omega_2)$ для процесса дозирования и дальнейшей упаковки $Y5(Q)$.

$$q_2(t) = \omega_2(t)\rho v_u, \quad (8)$$

где, $q_2(t)$ – расход МК из бункера от времени t ;

ω_2 – скорость привода дозатора стаканчикового типа;

ρ – плотность МК; h – уровень МК; v_u – скорость истечения МК.

$$q_3(t) = \frac{\omega_2(t)\rho m_i}{\omega_1} \quad (9)$$

Неравномерность подачи молотого кофе в устройстве дозирования кофе является важнейшим фактором, влияющим на производительность фасовочно-упаковочного автомата (ФУА). Для качественной оценки дозирования контролируются величины значения промежуточной координаты и скоростей приводов устройства дозирования кофе (УДК) и устройства питателя кофе (УПК). Точность дозирования любым типом дозатора обуславливается техническими требованиями и ограничивается технологическим допуском.

$$dE = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\text{ср}}}, \quad (10)$$

где Q_{\max} , Q_{\min} , $Q_{\text{ср}}$ – максимальная, минимальная и средняя производительность стаканчикового дозатора ($\text{м}^3/\text{с}$) при работе на одну и ту же установленную дозу МК.

Сложности настройки приводов в процессе дозирования молотого кофе (ДМК) приводят к функциональным ограничениям процесса объемного

дозирования, обусловленными уменьшением возможностей стабильной работы дозатора в требуемом диапазоне параметров ДМК.

На основе полученных структур построена структура нейронной сети, типа многослойный персептрон с одним скрытым слоем - ПИД контролером для автоматизации процесса управления объемным дозированием продуктов МК (рис. 6), которая, как показали проведенные исследования, и является наиболее перспективной для решения поставленных задач.

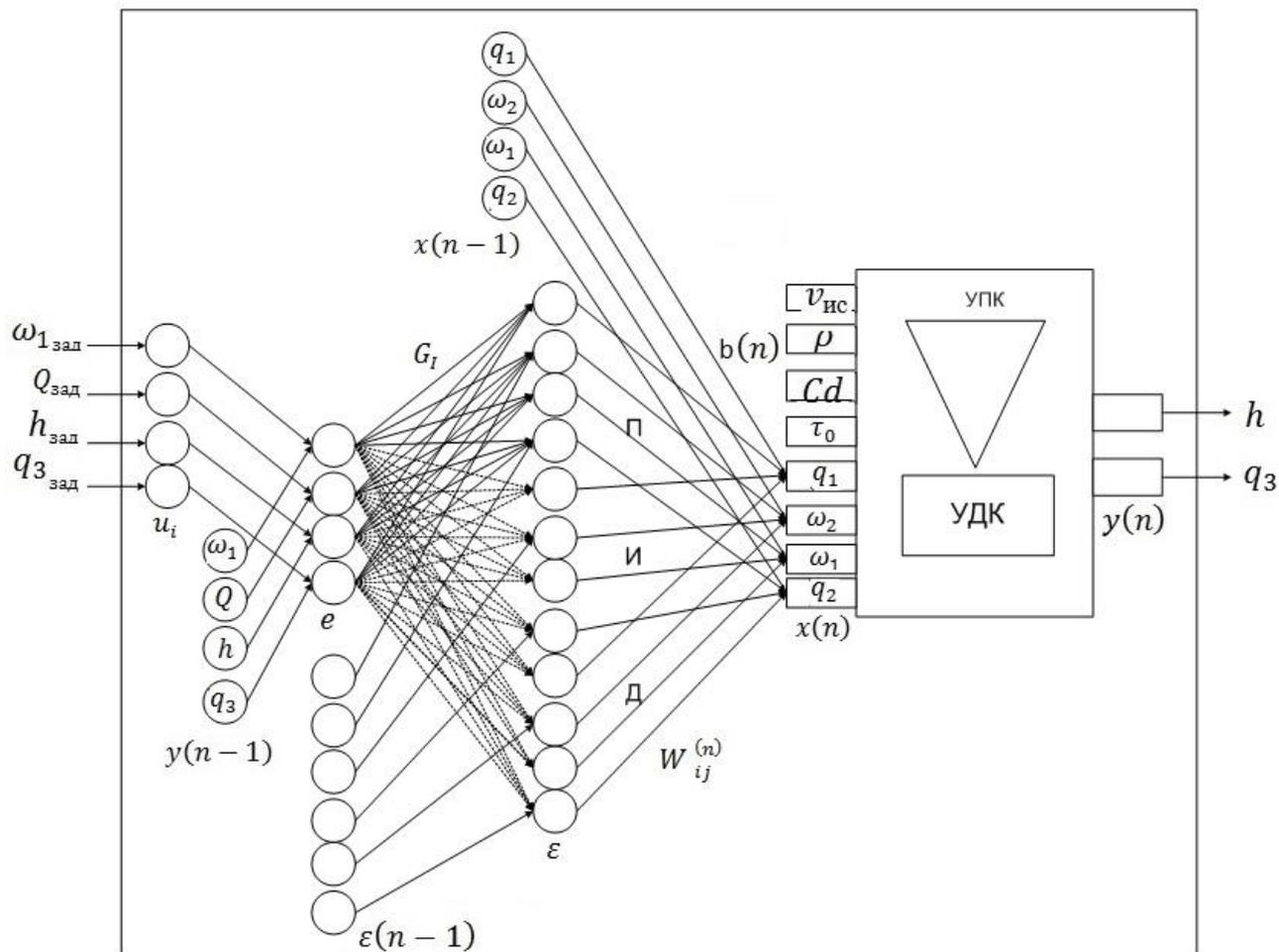


Рис. 6. Структура нейронной сети, типа многослойный персептрон с одним скрытым слоем - ПИД контролером управления процессом объемного дозирования МК

Входной вектор структуры нейронной сети (НС) состоит из данных автоматических измерений, характеризующих состояние технологического процесса дозирования МК в определенный момент времени. На выходе НС процесса ДМК формирует выходной сигнал величины уровня МК и расхода порции в мерных стаканах дозатора. Заданными значениями величины контроля u_i в процессе ДМК являются скорость устройства питателя кофе (УПК) $\omega_{1\text{зад}}$ и производительность устройства дозирования кофе (УДК) $Q_{\text{зад}}$,

где рассматривается скорость стаканчикового дозатора $\omega_{2\text{зад}}$, промежуточная координата (уровня) МК $h_{\text{зад}}$ в бункере и объем порции $q_{3\text{зад}}$.

Значения параметров $y(n-1)$ показывают текущие значения управляющих величин коэффициентов последнего значения времени, $x(n-1)$ текущие значения входных параметров последнего значения времени комплексного фасовочно-упаковочного аппарата как объект управления, такие как объем кофе, из УПК q_1 и объем из выходного отверстия бункера q_2 .

Скрытый слой состоит из текущего рассогласования последнего значения времени ПИД контролера $\varepsilon(n-1)$, мгновенной ошибки регулирования ε и рассогласования выходного сигнала процесса ДМК e . Это значит, что этот слой действует как стационарный предварительный компенсатор возмущающих факторов на процесс дозирования МК. Этот компенсатор является постоянной матрицей G_I , где между контурами управления уменьшается мгновенная ошибка регулирования ПИД контролера ε и определяются ошибки в последних двух временных шагах. Как возмущающие факторы $b(n)$, рассматриваются скорость истечения продукта $v_{\text{ис}}$, физико-механические свойства, такие как коэффициент истечения частиц МК Cd и плотность кофе ρ . Текущие значения входных параметров процесса ДМК $x(n)$ и выходной сигнал ПИД контролера ε обеспечивают высокое качество регулирования и позволяют оптимизировать управление по отдельным критериям.

Выходные сигналы из системы автоматизации процесса управления дозированием МК будут.

$$h = u_h + \sum_{i=1}^n x_i(n) W_{ij}^{(n)} + x_i(n-1) W_{ij}^{(n-1)} \quad (11)$$

$$q_3 = u_{q_3} + \sum_{i=1}^n x_i(n) W_{ij}^{(n)} + x_i(n-1) W_{ij}^{(n-1)} \quad (12)$$

Рассчитывается ошибка сети для выходного слоя по формуле:

$$\delta x_i = f'(x_i) \sum_{j=1}^n \delta y_j \frac{dy_j}{dx_i} \quad (13)$$

Математическое ожидание объема порции продукта МК определяется по формуле (14).

$$m_i = X_{\phi_m}(t - t_i) - u(t - t_i), \quad (14)$$

где $X_{\phi_m}(t - t_i)$ – составляющая метаматематического ожидания, учитывающая изменение физико-механических свойств МК;

$u(t - t_i)$ – сигнал управления промежуточной координаты и приводов подачи и дозатора СД;

t_i – время запаздывания при воздействии управляющего сигнала промежуточной координаты и скоростей приводов.

Разработанная в системе «Matlab» имитационная модель управления процессом дозирования молотого кофе представлена на рис. 7 с указанием входных и выходных параметров процесса дозирования молотого кофе.

Объем порций доз молотого кофе q_3 , засыпаемых в мерные стаканы дозатора (СД) на t –цикле дозирования, будет формироваться по законам распределения с учетом изменения математического ожидания m_i , среднего квадратического отклонения объема молотого кофе и промежуточной координаты в бункере дозатора, а также среднего объема и дисперсии частиц МК, которые задаются в начале эксперимента. При равномерном законе распределения продукта МК, математическое ожидание m_i полностью определяет этот закон при заданной средней значений порций объема и дисперсии частиц молотого кофе.

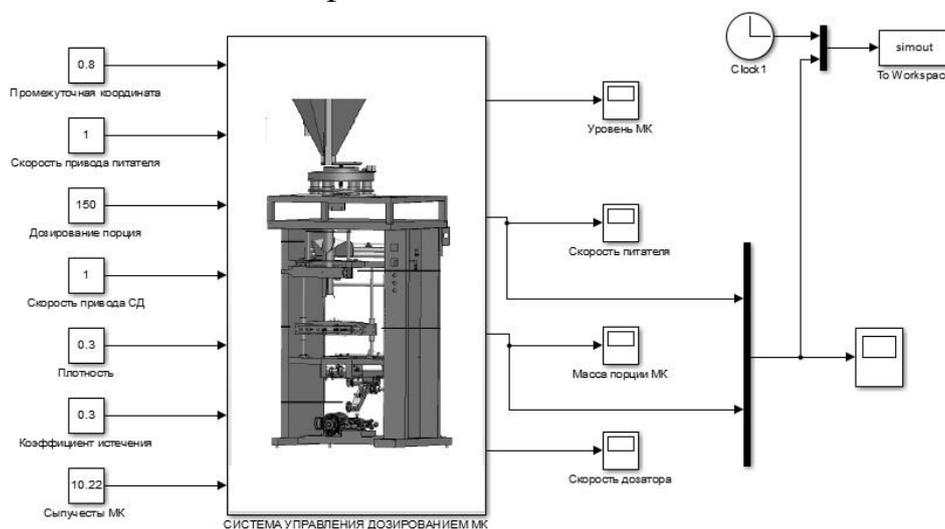


Рис. 7. Имитационная модель процесса управлением дозирования молотого кофе.

Модель системы управления процессом дозирования молотого кофе имеет подсистему, которая представляет собой многоблочную структуру. Количество блоков соответствует числу компонентов в процессе в среде моделирования «Matlab» (рис. 8).

В схеме имеется контур управления приводом питателя, контур управления приводами дозатора и бункера.

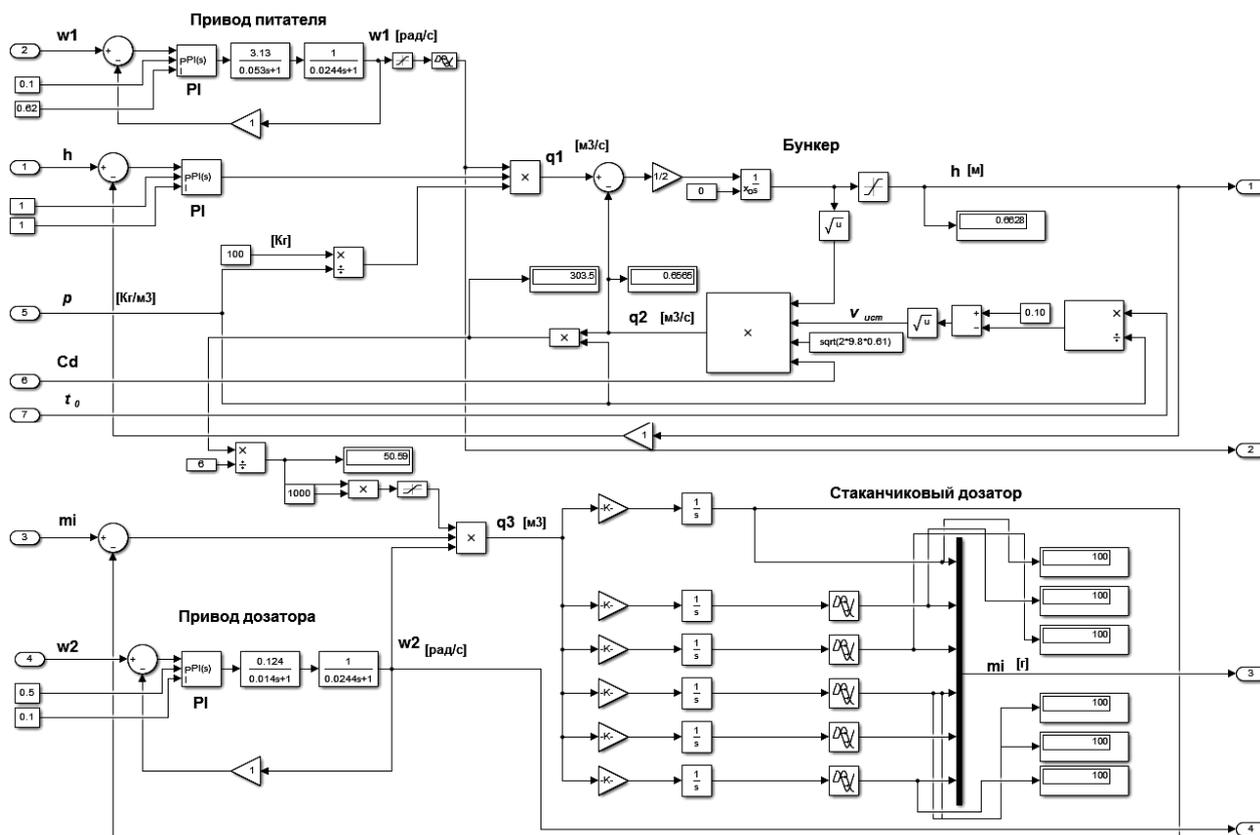


Рис. 8. Структурная схема подсистемы модели управления процессом дозирования молотого кофе.

В случае применения для регулирования скоростей питателя и дозатора частотных преобразователей возможно для управления приводами использовать классические ПИ регуляторы. При оценке поведения дозатора при действии возмущений с применением среды «Matlab» используется представление привода в виде последовательного включения двух апериодических звеньев.

Управление скоростью вращения приводов осуществляется в зоне рабочего участия механической характеристики, т.е. передаточная функция двигателя по каналу частота питающей сети – скорость вращения включает произведение двух компонент (формула 15). Первая описывает электромеханическую составляющую, вторая – механическую составляющую. Оба звена – апериодические звенья первого порядка.

$$W_{эд}(s) = \frac{K_{дв}}{T_3 s + 1}, \quad W_{мех}(s) = \frac{K}{T s + 1}$$

$$D_i(s) = \frac{K_{дв} K}{(T_3 s + 1)(T s + 1)} \quad (15)$$

Передаточная функция тиристорного преобразователя с системой импульсно-фазового управления силовыми элементами.

$$w_{mn} = \frac{K_{np} e^{\tau p}}{T_y p + 1} \quad (16)$$

Выявлен метод для стабилизации границ устойчивости движения молотого кофе на границах различных зон течения при управлении процессом дозирования, и для этой цели предлагается введение системы управления, которая направлена на стабилизацию режима истечения молотого кофе из бункера стаканчикового дозатора посредством управления промежуточной координатой:

$$\omega_{1_{зад}} - \omega_{2_{зад}} = F4(Q_{зад}, h_{np}, L), h_{np} = h_{зад} \pm \Delta h, \quad (17)$$

где h_{np} – промежуточная координата (уровень МК);

$F4$ – функция, определяющая зависимость разности расчетных значений, скоростей приводов питателя и дозатора СД от выделенных параметров состояния;

L – набор возмущений и конструктивных свойств объемного дозатора.

Принято допущение, что на основе решения уравнения (см. формулу 17) для заданных свойств порошковых и зерновых частиц молотого кофе и определенной конструкции дозатора, его режимных параметров можно обеспечить устойчивость режима истечения порошковых и зерновых частиц молотого кофе без образования стволых режимов течения и застойных зон в объеме бункера при стабилизации уровня кофе.

Таким образом, в качестве промежуточной координаты рассматривается уровень пищевого продукта в бункере, поддерживаемый в пределах, не приводящих к образованию застойных зон для заданных вида стаканчикового дозатора и физико-механических свойств молотого кофе.

Разработанная модель управления процессом дозирования молотого кофе, позволяет исследовать случайные возмущения как со стороны изменения скорости приводов питателя УПК и дозатора УДК, так и со стороны изменения свойств МК. Исследовано влияние на уровень действия внешних возмущений. В качестве критерия управления после анализа полученных исследований выбрана заданная производительность технологической линии с наложенными на нее ограничениями на колебания объемной массы молотого кофе в упаковке.

Результаты имитационных экспериментов автора, проведенные в среде «Matlab», показали, что при применении пропорционально-интегрального закона регулирования позволило обеспечить, более точную стабилизацию уровня молотого кофе, чем при использовании позиционного закона управления в условиях колебаний свойств молотого кофе.

Четвёртая глава. В данной главе выполнен сравнительный анализ результатов моделирования. Разработана комплексная модель системы управления процессом объемного дозирования молотого кофе. Кроме того, приведены результаты анализа режимов работы стаканчикового дозатора, функционирующего в реальном времени, с использованием ПИ - регулятора с возможностью последующей коррекции работы системы управления на основе нейросетевого оптимизатора.

Анализ результатов моделирования показал, что при больших изменениях в процессе колебании уровня молотого кофе в бункере непредсказуемо изменяется точность доз молотого кофе, даже с выходом за пределы, указанные в технической характеристике стаканчикового дозатора. Таким образом, случайные изменения масс формируемых частичных доз 100 грамм порции молотого кофе (рис. 9) могут содержать не только собственно случайную составляющую, но и регулярную случайную составляющую, обусловленную, например, изменениями физико-механических свойств дозируемого вида молотого кофе в бункере объемного дозатора и изменениями скоростей приводов устройств подачи и дозирования. Это значительно влияет на производительность (см. рис. 10). Существенная абсолютная ошибка объема порции дозирования молотого кофе, составляющая при проведении экспериментов 16.76%, категорически не допустима. Согласно технологическим требованиям при производстве молотого кофе допустимая абсолютная ошибка объема порции дозирования должна составлять не более 3%.

Полученные экспериментальные результаты показали, что при использовании ПИ-регулятора в системе управления приводами абсолютная ошибка объёма порции дозирования составляла 2.1%; время переходного процесса 0.13с, что соответствует настройке регулятора на технический оптимум. Установлены следующие параметры настройки ПИ – закона регулирования для привода питателя: $Kp = 0.01, Ki = 0.1$, а для привода стаканчикового дозатора $Kp = 1.8, Ki = 0.0021$. В таблице 1 показывается максимальная производительность с применением законов регулирования ПИ контроллера.

Оптимальные коэффициенты ПИ закона регулирования при использовании и контроллера на основе нейросетевого оптимизатора (НСО) для привода дозатора при заданном значении $h = 0.7\text{м}$ составили $Kp = 0.01, Ki = 0.086$, а для привода питателя $Kp = 0.01, Ki = 0.0099$.

Таким образом, при поступлении команды от ЭВМ о необходимости стабилизации уровня молотого кофе в бункере стаканчикового дозатора,

регулирования скорости приводов питателя и дозатора – переходе в энергосберегающий режим, устройство питателя определяет загрузку молотого кофе в соответствии с режимом работы стаканчикового дозатора и формирует необходимую, экономически выгодную, уставку по скорости в систему автоматического регулирования процесса дозирования молотого кофе.

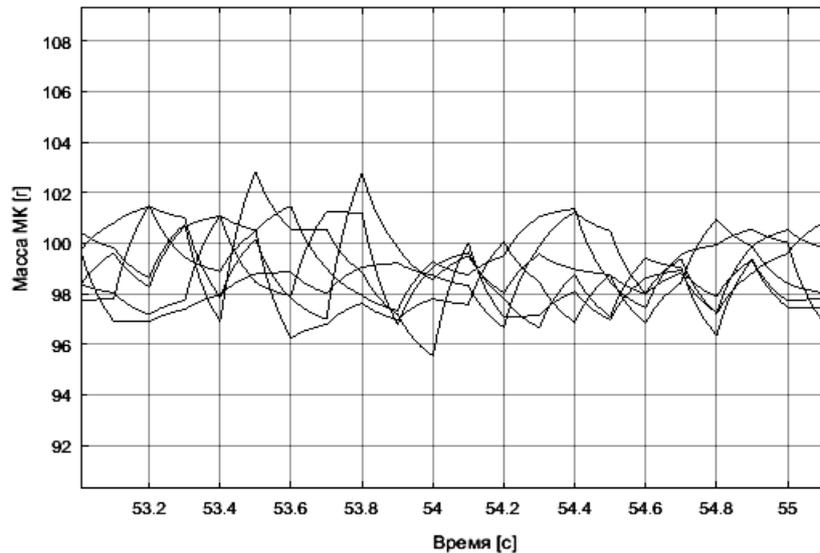


Рис. 9. Колебания объемных масс порции МК при заданной порции 100 грамм в мерных стаканках дозатора при действии внешних возмущений по закону нормального распределения помехи

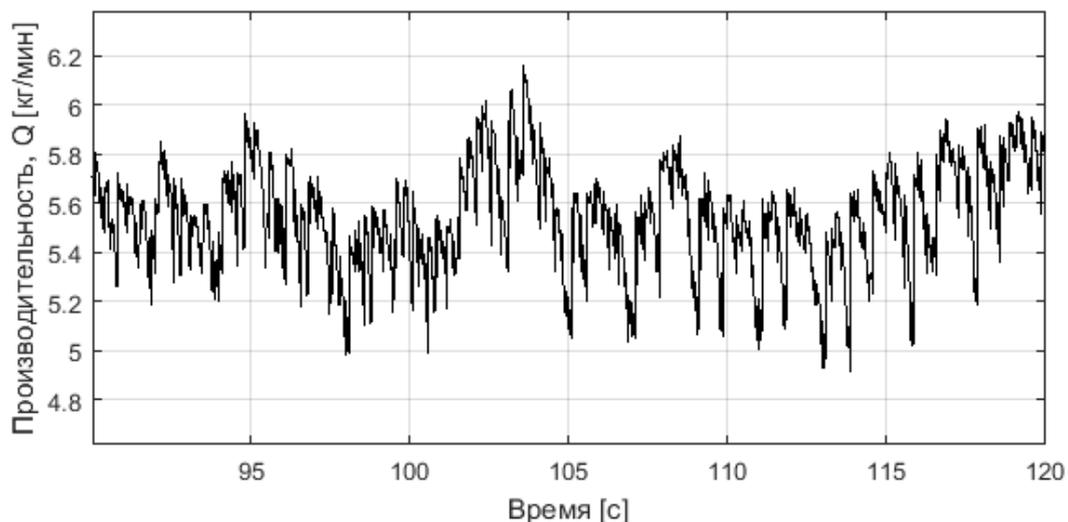


Рис. 10. Переходные характеристики процесса производительности при действии внешних возмущений по закону нормального распределения помехи

Система автоматического регулирования переводит частоту вращения приводного электродвигателя на заданную скорость приводов питателя и дозатора без опасных динамических нагрузок на устройство питателя и стаканчикового дозатора.

Таблица 1.

№ п/п	Вид объема частиц кофе	$v, м/с$	$q_1,$ $м^3/с$	$q_2,$ $м^3/с$	$m_i, г$	Максимальная производительность, Q	
						Без ПИ- регулятора, [упак/мин]	С ПИ- регулятором, [упак/мин]
1	$\rho = \pm 300$ $Cd = 0.1$ $\tau_0 = \pm 7.16$	0.20	0.005	0.006	95.59	31.11	51.21
2	$\rho = \pm 450$ $Cd = 0.3$ $\tau_0 = \pm 7.16$	0.25	0.007	0.007	97.4	32.59	52.39
3	$\rho = \pm 600$ $Cd = 0.6$ $\tau_0 = \pm 7.16$	0.49	0.01	0.01	96.29	50.47	60.07
4	$\rho = \pm 450$ $Cd = 0.3$ $\tau_0 = 10.22$	0.24	0.007	0.007	97.4	32.59	52.19

Тем не менее, поддержание стабильности величины промежуточной координаты в бункере дозатора позволяет осуществить равномерное истечение продукта, избежать сводообразования и сегрегации и устранить ошибки точности дозирования.

Предлагаемые усовершенствованные решения, внесенные в схему реализации ПИ-нейросетевого оптимизатора, позволили обеспечить стабилизацию параметров производительности и промежуточной координаты (рис. 11) при действии возмущающих факторов и смене задания управляющего воздействия за счет авто-настройки коэффициентов ПИ закона на контроллере для приводов устройств питателя и стаканчикового дозатора путем обеспечения требуемого качества переходного процесса.

В таблице 2 описаны полученные результаты при использовании нейросетевого оптимизатора ПИ контроллера.

Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать вывод о том, что нейросетевой оптимизатор контроллера с использованием ПИ-закона регулирования позволяет осуществить равномерное истечение продукта,

избежать сводообразования и сегрегации и устранить ошибки точности дозирования при стабилизации уровня материала в бункере дозатора.

Таблица 2.

Вид порция частиц кофе		Производительность, кг/мин с учетом алгоритмов компенсации ПИ	Производительность кг/мин с учетом алгоритмов компенсации НСО	Увеличение Производительности, %
ρ , кг/м ³	300	3.771	6.021	35 %
	450	5.641	6.021	7%
	600	5.912	6.021	1%
Cd	0.1	5.641	6.021	7%
	0.3	5.641	6.021	7%
	0.6	5.641	6.021	7%
τ_0 , кг/м ²	7.16	5.641	6.021	7%
	10.22	5.641	6.021	7%

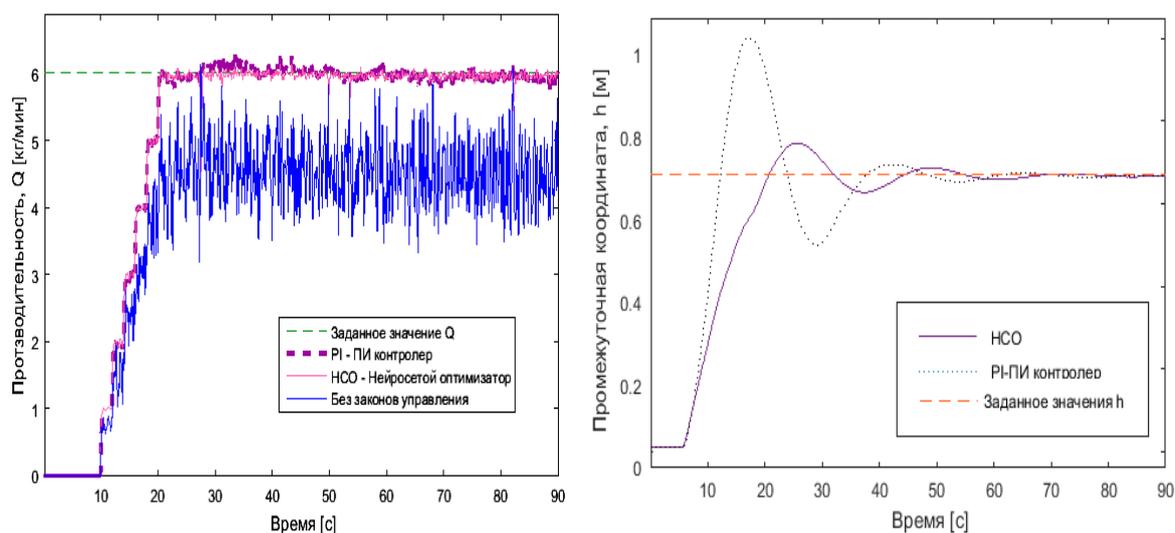


Рис. 11. Результаты реализации ПИ-нейросетевого оптимизатора на переходные процессы по стабилизации параметров: а) производительности, б) промежуточной координаты

Учитывая результаты проведенных исследований, разработан макет программно-аппаратного комплекса управления процессом дозирования молотого кофе, показанный на рис. 12. Управление процессом дозирования осуществляется с использованием пакета LabVIEW на основе использования полученных оптимальных коэффициентов ПИ контроллера нейросетевого оптимизатора при применении имитационной модели процесса дозирования.

Показано, что основными категориями решаемых данной задачей моделирования являются: автоматический контроль, непрерывное наблюдение (мониторинг) информации о ходе технологического процесса дозирования молотого обжаренного кофе; регулирование этих процессов; автоматический

контроль состояния используемого оборудования и режимов его работы; анализ нестационарных режимов и аварийных ситуаций; использование современных средств печати графиков и экспорта информации в формате Microsoft Excel.

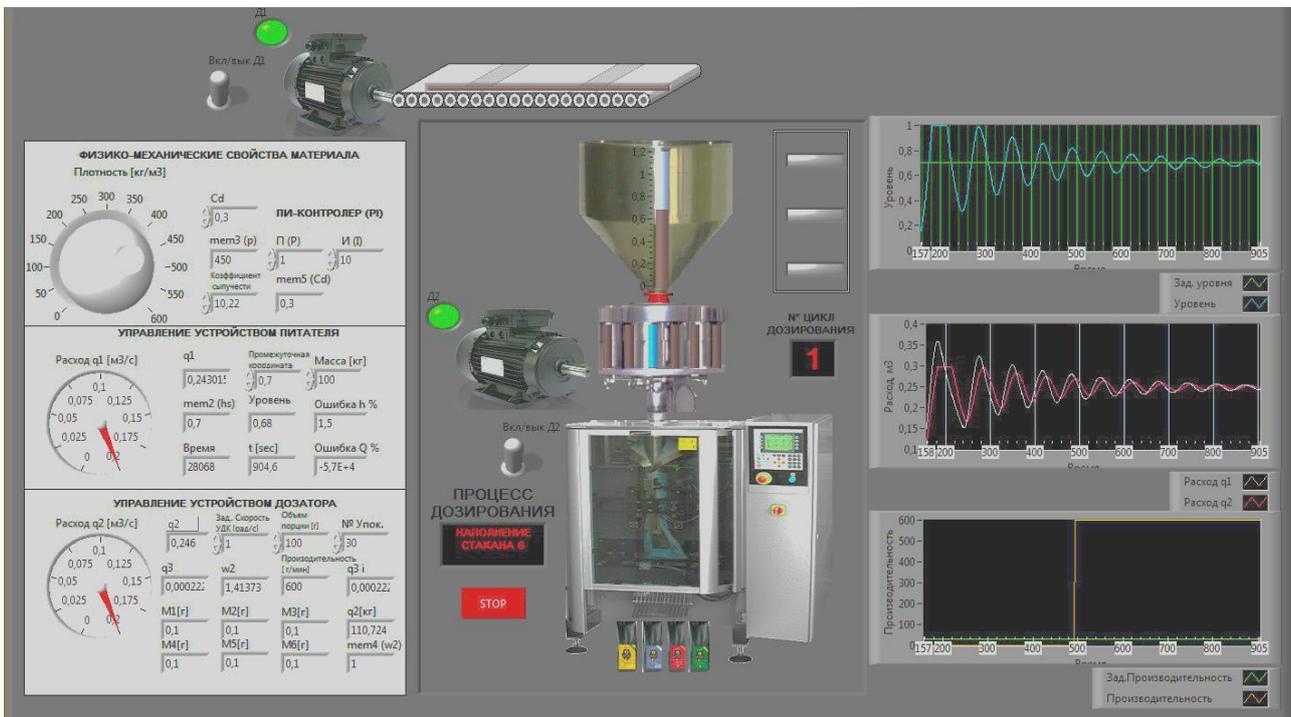


Рис. 12. Лицевая панель системы управления процессам дозирования молотого кофе с использованием среды LabVIEW

Входные и выходные переменные и полученные математические модели описываются в блоке диаграммы программно-аппаратного комплекса (рис. 13).

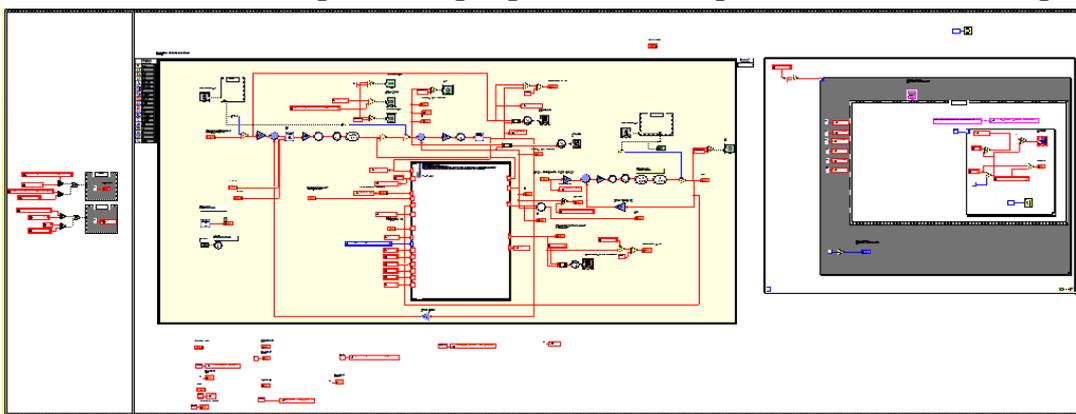


Рис. 13. Блок-диаграмм программно-аппаратного комплекса в среде LabVIEW

Разработанный и созданный макет программно-аппаратного комплекса также можно использовать для лабораторных исследований других видов пищевых продуктов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе проведенного анализа существующих схем дозаторов сыпучих материалов и их фасовочных машин установлено, что для технологического процесса дозирования таких пищевых продуктов как молотый кофе с неправильной структурой формы наиболее перспективными являются стаканчиковые дозаторы дискретного действия.

2. Проведен всесторонний анализ параметров, оказывающих влияние на качество молотого кофе, на ход каждой операции при процессе дозирования. Выбраны контролируемые и регулируемые параметры как показатели контроля качества: промежуточный координат (уровень), плотность, коэффициент истечения, скорость дозатора и скорость привода питателя. Рассмотрены и проанализированы методы и средства автоматического контроля в потоке этих показателей, которые учитывают влияние транспортного вращения системы на характер движения молотого кофе в питателе и влияние скорости вращения привода дозатора, как следствие, на производительность стаканчикового дозатора.

3. В данной диссертационной работе рекомендуется для контроля влажности молотого обжаренного кофе, использовать дозаторы только в закрытых помещениях при температуре $15.65^{\circ}\text{C} \pm 2.15^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $79.87\% \pm 1.05\%$.

4. Проведено экспериментальное исследование основных физико-механических свойств молотого кофе, позволившее осуществить выбор параметров, оказывающих наибольшее влияние на качество дозирования, где доказано результатами в оборудовании НТ-educator, что частицы молотого кофе имеют неправильные формы и являются связным материалом, что усложняет описать математическую модель процесса истечения молотого кофе в дозирующее устройство. Установлена зависимость физико-механических свойств молотого кофе от характеристики конструкции бункера и сил напряжений. Параметры, которые помогли найти адекватные коэффициенты для создания имитационной модели. Определены форма и размеры параметры конструкции бункера объемного дозатора, чтобы обеспечить устойчивое течение молотого кофе и скорость истечения продукта по методам дискретным элементов.

5. Разработана перспективная методика управления уровнем молотого кофе, позволяющая осуществить переход от применения простого, позиционного закона управления уровнем молотого кофе в бункере дозатора к моделированию изменения уровня в специализированном контроле управления дозатором непосредственно в процессе функционирования. Снижение вариаций

уровня предоставляет возможности контроля процесса образования застойных зон и обеспечивает стабилизацию режима истечения продукта из бункера объемного дозатора.

6. В качестве критерия управления, производительность технологической линии с наложенными на нее ограничениями на колебания объемная масса молотого кофе в упаковке.

7. Разработана математическая имитационная модель процесса дозирования молотого кофе, позволяющая исследовать влияние на качество получаемого продукта уровень действия внешних возмущений как со стороны изменения скорости приводов питателя и дозатора, так и со стороны изменения физико-механических свойств молотого кофе.

8. Разработана методология управления приводами процесса дозирования и логического управления уровнем молотого кофе, позволяющая контролировать образование застойных зон в бункере дозатора и повысить однородность содержимого молотого кофе в упаковках за счет управления режимом движения.

9. Получен алгоритм работы модуля контроля и регулирования величины уровня молотого кофе в процессе дозирования и разработан нейросетевой оптимизатор контроллера с использованием ПИ закона регулирования, позволяющий найти оптимальные коэффициенты и сократить перерегулирование и время регулирования производительностью дозатора при действии случайных возмущений.

10. Разработан макет программно-аппаратного комплекса управления процессом дозирования пищевых продуктов на примере молотого кофе с помощью пакета LabVIEW на основе оптимальных коэффициентов ПИ нейросетевого оптимизатора. Показано, что основными категориями решаемых в данной работе задач являются: автоматический контроль, непрерывное наблюдение (мониторинг), и регулирование процессов дозирования производства молотого обжаренного кофе для лабораторных исследованиях сыпучих пищевых продуктов.

11. Предложенный макет программно-аппаратного комплекса управления процессом дозирования кофе позволяет усовершенствовать управление технологическим процессом производства молотого кофе в соответствии с заданными параметрами. Управляющие функции автоматизированной системы управления дозированием заключаются в стабилизации значений уровня материала в бункере и коррекции скорости подачи пищевого продукта в питатель и стаканчиковый дозатор.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации:

1. Сантос М.Р. Имитационная модель управления уровнем молотого кофе в бункере с помощью многодвигательных приводов /Интернет-журнал «Науковедение». 2015 Том 7, №1 [Электронный ресурс] – Идентификационный номер статьи в журнале: 98TVN115. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/98TVN115.pdf> (доступ свободный).

2. Сантос М.Р. Математическая модель и автоматизация процесса объемного дозирования молотого кофе на базе Scada системы Labview/ Интернет-журнал «Науковедение». 2015 Том 7, №4 [Электронный ресурс]. – Идентификационный номер статьи в журнале: 38TVN415. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/38TVN415.pdf> (доступ свободный).

3. Сантос М.Р., Ахремчик О.Л. Особенности промышленных контроллеров для управления дозированием сыпучих продуктов в пищевой промышленности//Промышленные АСУ и контроллеры, №2, 2015. с.51-55.

В других изданиях:

4. Сантос М.Р., Ахремчик О.Л. Изменение координатного пространства при проектировании системы управления процессом дозирования сыпучих продуктов //Вестник Тверского государственного технического университета, №1 (27), 2015. с.22-27.

5. Сантос М.Р. Определение эквивалентных размеров частиц при гранулометрическом анализе молотого кофе//Вестник Тверского государственного технического университета, №1 (23), 2013. с.24-27.

6. Сантос М.Р. Определение состава фракций молотого кофе на основе зондовой микроскопии //Вестник Тверского государственного технического университета, №2 (24), 2013. с.17-20.

7. Сантос М.Р. Задача измерения влажности кофе. Сборник трудов магистрантов и аспирантов. Вып. 3. Тверь, РИЦ ТвГТУ. 2013. С. 50-53.

8. Сантос М.Р. Фреймовый подход к описанию дозаторов сыпучих материалов. Сборник трудов магистрантов и аспирантов. Вып. 2. Тверь, РИЦ ТвГТУ. 2012. С. 134-137.

9. Сантос М.Р., Ахремчик О. Л. Анализ подходов к моделированию процессов истечения мелкодисперсных пищевых сыпучих продуктов из бункеров объемных дозаторов. Материалы 9-ой межд. научно-техн. конференции «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования», 18-19 марта 2014 г., г. Вологда, ВолГУ, С.25-28.

10. Сантос М.Р., Ахремчик О. Л. Методика определения параметров модели при управлении уровнем молотого кофе в дозаторе. 27 межд. научн. конф. «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ- 27», 3 – 5 июня 2014 г. Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Т.2 С. 96-98

11. Сантос М.Р., Ахремчик О.Л. Инновационные возможности систем управления дозаторами пищевых сыпучих продуктов// Сб. статей межд. научно-практ. конф. «Innovation 2014», Ташкент 23-24 октября 2014 г., Ташкент, 2014. С.117-119.

12. Сантос М.Р., Ахремчик О.Л. Оценка распределения плотности сыпучего продукта при производстве пакетированного кофе//Сб. трудов 26 междунар. научн. конф. «Математические методы в технике и технологиях-ММТТ 26», Н. Новгород, НГТУ им. Н.Е. Алексеева, 2013. - Т.7., с.61-63.

13. Сантос М.Р., Ахремчик О.Л. Расширение параметров состояния бункеров объемных дозаторов мелкодисперсных продуктов // Сб. трудов научно-практ. конф. «Актуальные проблемы автоматизации и управления», 5-7 июня 2013 г. Челябинск, ЮУрГУ, 2013, с. 9-11.

14. Сантос М.Р., Ахремчик О. Л. Специализированные контроллеры для управления исполнительными устройствами в химических производствах. Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные инженерные проблемы химических и нефтехимических производств и пути их решения», 18 мая 2012 г. Нижнекамск, Нижнекамский химико-технологический институт, 2012. С. 218-219.

15. Сантос М.Р. Нейронная сеть системы автоматизации процесса управления объемным дозированием молотого кофе // Academic science - problems and achievements XI: Proceedings of the Conference. North Charleston, 6-7.02.2017, Vol. 2—North Charleston, SC, USA: Create Space, 2017, с.102-106.

16. Сантос М.Р., Благовещенская М.М. Использование нейронной сети для автоматизации процесса управления объемным дозированием молотого кофе // Научная конференция с международным участием «Развитие пищевой и перерабатывающей промышленности России: кадры и наука», 11– 12 апреля 2017 г., МГУПП, с.102-106.

17. Сантос М.Р, Благовещенская М.М. Структура систем управления дозированием с использованием нейронных сетей. Общеуниверситетская студенческая конференция студентов и молодых ученых "День науки" Сборник материалов конференции: в 6 частях. 2017. С. 263-267.

18. Сантос М.Р, Благовещенская М.М. Система автоматизации процессом управления объемным дозированием молотого кофе с использованием нейронных сетей. Общеуниверситетская студенческая

конференция студентов и молодых ученых "День науки" Сборник материалов конференции: в 6 частях. 2017. С. 267-271.

19. Сантос М.Р, Благовещенская М.М. Использование нейросетевых технологий для управления процессом объемного дозирования молотого кофе. Тезисы докладов международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики», посвященной 170-летию со дня рождения великого русского ученого Николая Егоровича Жуковского. Москва, 24-27 октября 2017 года, С. 196 - 197.