

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

на правах рукописи

САНТОС КУННИХАН МАРИО РОХЕЛИО

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

Специальность 05.13.06. Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

Д и с с е р т а ц и я
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Заслуженный деятель науки
Российской Федерации, доктор
технических наук, профессор
Благовещенская М.М.

Москва – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....	16
1.1. Исследование и анализ технологического процесса производства кофе как объекта автоматизации. Характеристика органолептических свойств наиболее распространенных сортов кофе	16
1.2. Технологическое операции производства кофе.....	19
1.3. Анализ процесса дозирования молотого кофе. Характеристика молотого кофе. Выбор факторов, определяющих эффективность этого процесса.....	24
1.4. Анализ информативности параметров качества зерен кофе (сырья), готовых зерен кофе и размолотого кофе. Выбор из них контролируемых и регулируемых	30
1.5. Современные методы контроля показателей качества при производстве молотого кофе.....	33
1.6. Обзор и анализ существующих современных инструментальных методов и средств контроля основных показателей качества зерен кофе (сырья), готовых зерен кофе и размолотого кофе.....	34
1.7. Состояние с автоматизацией процессов производства кофе в Эквадоре и в других странах.....	38
1.8. Анализ дозаторов как базовой составляющей технологического процесса производства молотого кофе	40
1.9. Параметрическая модель объемного дозатора молотого кофе	44
1.10. Системы управления дозаторами	45
1.11. Структура систем управления дозированием	49
1.12. Выводы по первой главы.....	53

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ДОЗИРОВАНИЕМ МК.....	55
2.1. Экспериментальное исследование дисперсного состава МК.....	55
2.1.1. Определение статистических характеристик размера частиц молотого кофе.....	59
2.1.2. Определение насыпной плотности молотого кофе	63
2.1.3. Экспериментальное определение сыпучести МК.....	64
2.2. Анализ аналитических подходов к моделированию процесса истечения молотого кофе из бункера дозатора.....	68
2.3. Скорость свободного истечения МК.....	76
2.4. Параметры конструкция бункера стаканчикового дозатора (БСД).....	78
2.5. Моделирование с использованием метода дискретных элементов МДЭ	80
2.6. Имитационные модели процессов дозирования.....	86
2.6.1. Применение методов имитационного моделирования для исследования асимптотического движения дозатора СД и контроля уровня МК	88
2.7. Параметрическая модель объемного дозирования МК.....	91
2.8. Стохастические процессы, влияющие на процесс ДМК	93
2.9. Выводы по второй главы.....	96
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДОЗИРОВАНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ	99
3. 1. Критерии управления процессом дозирования	99
3. 2. Применение методологии управления приводом в технологическом процессе производства молотого кофе	105
3. 3. Уровень кофе в бункере как промежуточная координата процесса управления дозированием МК.....	107
3. 4. Разработка нейросетевой модели для управления процессом дозирования МК	108

3. 5. Имитационная модель системы управления процессом дозирования молотого кофе.....	116
3. 6. Постановка задачи моделирования и допущения, используемые при разработке моделей управления процессом ДМК.....	119
3. 7. Выводы по третьей главы	124
ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И АПРОБАЦИЯ МАКЕТА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЪЕМНОГО ДОЗИРОВАНИЯ МОЛОТОГО КОФЕ	126
4.1. Анализ результатов имитационного моделирования при управлении процессом дозирования МК. Синтез дозатора и оптимальных характеристик закона их заполнения. Управление формированием видом истечением частичных масс МК.....	126
4.2. Определение оптимальных параметров настройки системы управления процессом дозирования МК.	136
4.3. Оценка качества имитационной модели ДМК.....	141
4.4. Разработка экспериментального макета программно-аппаратного комплекса управления процессом ДМК.	142
4.5. Структура экспериментального макета программно-аппаратного комплекса управления процессом ДМК. Описание программ на ЭВМ и апробация экспериментального макета в учебной деятельности	150
4.6. Выводы по четвертой главы	153
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	155
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	158
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	160
ПРИЛОЖЕНИЯ	180

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

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.

В настоящее время потребление молотого обжаренного кофе занимают ведущее место среди отраслей пищевой промышленности, а эта продукция пользуется неизменным и значительным спросом не только у населения России, но и всего земного шара.

Одной из важнейших технологических операций в ходе приемки, хранения и переработки кофе при производстве молотого обжаренного кофе, является дозирование.

При обеспечении продовольственного рынка Российской Федерации качественными пищевыми продуктами из государства Эквадора рассматриваются, вопросы системы управления процессом объемного дозирования пищевых продуктов как актуальная тема. Разработка непрерывного системы управления процессом дозирования приобрели за последнее время особую актуальность в пищевой промышленности. Конечный результат и качество изготавливаемой продукции зависит от точности и надежности дозирования. Значительно увеличились поставки в Россию молотого обжаренного кофе из Эквадора. Быстрыми темпами развивается производство натурального жареного кофе в зернах, молотого натурального растворимого кофе и растворимых кофейных напитков.

Жесткие требования Российских стандартов, предъявляемых к кофе на всех этапах его переработки, требуют современного и быстрого контроля их соблюдения. Достаточно высокие цены на кофе, широкий ассортимент кофе и суррогатов зачастую приводит к фальсификации получаемой продукции, связанной с пересортицей и не полным объеме дозирования кофе в упаковку.

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.

В научной литературе известны работы, авторы которых ставили задачи совершенствования, автоматизации, системного анализа и управления процессами дозирования различных пищевых изделий. Однако проведенный нами анализ состояния теории и практики совершенствования процессов дозирования сыпучих пищевых материалов показал, что многие актуальные вопросы совершенствования этих процессов до настоящего времени не решены. Имеющиеся в настоящее время простые лабораторные методы контроля показателей качества молотого кофе имеют множество недостатков:

- невозможно контролировать в потоке
- качество полученного молотого кофе;
- образование застойных зон в бункере роторных дозаторов.

Повысить однородность содержимого продукта в упаковках можно за счет управления режимом движения, так как молотый кофе представляет собой трудно-сыпучий связный материал, который временно или полностью прекращает процесс истечения.

С помощью объемных дозаторов измеряют массу дозируемого молотого кофе по его объему. Но при процессе дозирования возникает проблемы со стабильностью подачи молотого кофе в дозирующий механизм и возможности 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. Поступающие при этом сигналы в технологический аппарат объемного дозатора, не соответствуют по своему техническому уровню и метрологическому обеспечению современному состоянию измерительной и управляющей техники. 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. Практически нет исследований по истечению молотого обжаренного кофе из аппаратов объемного дозирования, что затрудняет обеспечить качество готовой продукции упакованного молотого кофе, сводит к минимуму экономию, повышение производительности труда, обеспечение высококачественного ведения технологического процесса дозирования.

Совершенствование, автоматизация и оптимизация технологических процессов дозирования сыпучих материалов определяются за счет повышения качества управления ими. Системы управления дозированием сыпучих материалов используются на этапах управления ходом технологических процессов, для регламентации подачи исходного сырья кофе в технологические аппараты, для дозирования количества готовой продукции молотого кофе при ее фасовке, при подготовке к выполнению операций аналитического контроля, и в других случаях. 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 процессом 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, направленная 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.

Проведенный обзор и анализ работ посвященных этой проблеме выявил, что к настоящему времени физико-механические свойства молотого кофе и его закономерности движения и истечения были изучены и представлены в работах: В. Соколовского «Статика сыпучей среды» (1954), Г. К. Клейна «Строительная механика сыпучих тел» (1956), Р. Л. Зенкова «Механика насыпных грунтов» (1964), Г. А. Гениева «Основы динамики сыпучей среды» (1958)[131, 43, 65]. Закономерностями движения и истечения сыпучих материалов из емкостей, а также борьбы со сводообразованием занимались такие значительные ученые как Э. В. Дженике [57, 163-165], Р. Л. Зенкова [64] и другие [28, 35, 89, 149]. Определение физико-механических свойств молотого кофе и гранулометрический состав кофе CENICAFE занимались Ricardo Alonso

Guevara - Barreto [158]; José Jaime Castaño - Castrillón [168,169]. Также важно отметить научные работы Jesús Gadea Sáinz «Проблемы гранулометрических состав строительных материалов 2011г.» и работы «Проблемы дозирования строительных материалов 2014г.» в университете Бургоса – Испания [167, 166] и другие как J.L. Amorós, G. Mallol, E. Sánchez, J. García [162].

Исследования в области дозирования сыпучих материалов проводились в 1970-1980-х годах на Украине и в России Ю.В. Виденеева [36-38] и Е.Б Карпина [1, 72].

Развитие вычислительной техники и появление профессионального математического программного обеспечения как Matlab, LabView, позволили реализовать интересное исследование по компьютерному моделированию процесса дозирования. Такие работы как («Оптимизация процесса весового дозирования сыпучих материалов»), проведенные в 2007 году в Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры (г. Днепропетровск, Украина) [53], Ramirez Mercedes, Fabricio Garelli, Ariel Dominguez, Modesto Angulo «Имитационная модель и алгоритм контроля уровня материала в бункере» в Аргентине в 2009 г [178].

Кроме того было защищено несколько диссертаций в области математического моделирования процесса дозирования сыпучих материалов, такие работы как Давиденко П.Н. в 2005 г [55]; Колбасин А.М [75] «Автоматизация технологического процесса управления производством многокомпонентных сыпучих бетонных смесей с учетом ошибок дозирования»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2007 г.

Однако ключевые задачи математического моделирования управления процессом дозирования молотого кофе остаются нерешенными. Также, до настоящего времени не предложено никакой теоретически обоснованной методики расчета и управления режимами процесса дозирования с целью оптимизации этого процесса.

Одним из направлений повышения технологической надежности бункеров объемных дозаторов является установка в их полостях

сводоразрушающих устройств, параметры и режимы, работы которых должны соответствовать физико-механическим свойствам порошковых материалов, такие как молотый кофе, и конструктивным параметрам самих бункеров.

Одним из перспективных направлений развития автоматизации процессов пищевой промышленности является применение аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС), являющегося важным разделом теории искусственного интеллекта. ИНС способны решать широкий круг задач распознавания образов, идентификации, прогнозирования и оптимизации управления сложными объектами. В общетеоретическом плане ИНС исследовались в работах зарубежных ученых: Д. Хебба, Ф.Розенблатта, М.Минского, Дж. Холфидса, У.С. Мак - Коллака, У. Питтса, К.Э. Шеннона, Дж.М. Маккарти, Дж. Фон Неймана и др. Существенный вклад в решение научных и практических аспектов ИНС вносят отечественные ученые: В.В. Круглов, В.В. Борисов, Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев, С.А. Сергеев, С.В. Фомин, А.А. Фролов, В.Л. Дунин-барковский и др., а в пищевой промышленности – М.М.Благовещенская, О.Н. Лимбах, Е.В. Роденков, В.В. Садовой, В.А. Самылина, А.Г. Храмцов, А.В. Шаверин и др.

В настоящей работе был учтен и проработан опыт предыдущих исследований и были приняты во внимание все рекомендации, приводимые авторами перечисленных ранее трудов.

Анализ опубликованных научных работ в области ИНС свидетельствует о перспективности исследований по этой тематике, необходимости развития этого направления, а так же малочисленности данных исследований в области пищевой промышленности. Изучение отечественной и зарубежной литературы указывает на необходимость углубленного исследований в рассматриваемой области и применения новых подходов к использованию ИНС для построения виртуальных датчиков контроля показателей качества пищевых продуктов. В связи с чем, представляется своевременным и актуальным проведение комплексных исследований, направленных на автоматизацию контроля уровня молотого обжаренного кофе с применением интеллектуальных технологий;

разработку виртуального датчика уровня этих сыпучих масс бункере на основе нейросетевых алгоритмов; исследование возможности интеграции такого датчика в систему управления технологическим процессом дозирования.

Проведенные исследования показали возможность успешного решения поставленных задач автоматизации процесса дозирования молотого обжаренного кофе масс за счет внедрения в производственный процесс специально разработанного программно-аппаратного комплекса (ПАК) виртуального датчика, построенного на основе искусственной нейронной сети (ИНС), приемлемого по стоимости для любого пищевого предприятия.

Создание и внедрение виртуального датчика уровня с использованием интеллектуальных технологий и современных математических методов позволяет оптимизировать управление технологическими режимами линии дозирования кофе, непрерывно получать данные об уровне этих масс в бункере дозатора в течение всего технологического процесса в режиме реального времени, существенно уменьшить уровень брака, снизить потери рабочего времени, сырья и энергии, повысить качество готовой продукции. Решение этой проблемы позволит построить эффективную систему регулирования и управления технологическими процессами дозирования молотого кофе.

Исходя из вышеизложенного, тема диссертационной работы «Математическое и алгоритмическое обеспечение системы управления технологическим процессом объемного дозирования при производстве молотого обжаренного кофе» является актуальным направлением развития пищевой промышленности, имеющей важное народнохозяйственное значение, а также актуальной научно-технической задачей специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в пищевой промышленности). Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.06, 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 др.», «15.Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения».

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

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

Предметная область исследований 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.

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.

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 процессом 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 процессом дозирования молотого обжаренного кофе сорта «Арабика».

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 неправомерность 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.

Автор защищает: Модель процесса объемного дозирования молотого кофе и результаты его экспериментального исследования; математическое описание процессов объемного дозирования на основе физико-механических свойств молотого кофе; комплекс подпрограмм labview и визуализации режимов работы приводов подачи и роторного дозатора.

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 2014; XXVI Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-26) Вологда 2014; Научно-практической конференции «Актуальные проблемы автоматизации и управления» Челябинск 2013; XXVI Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-26) Нижний Новгород 2013; 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 диссертации опубликовано 16 научных работ, из них 3 в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. 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 185 наименования.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1. Исследование и анализ технологического процесса производства кофе как объекта автоматизации.

Характеристика органолептических свойств наиболее распространенных сортов кофе

Основным сырьем для производства кофе являются в основном два вида, получивших наибольшее распространение: Аравийский (C. Arabica) и Робуста (Canephora). Они представляют собой зерна средние по размеру, неоднородные по величине и окраске, несколько удлинённые и слегка вздутые, плоской и округлой формы. Их цвет может быть различен: от светло-желтого с зеленоватым оттенком до синевато-зеленого с серым оттенком. Кофе продукты делят на четыре основные группы: кофе натуральный жареный, кофе натуральный растворимый, кофейные напитки нерастворимые, кофейные напитки растворимые.

Арабика представляет 70% мирового производства кофе и считается лучший из-за его ароматических качеств и его мягкого вкуса, поэтому, как правило, дороже. Содержание кофеина зерна является относительно низким, от 0,9 до 1,5%.

Робуста, менее вкусный и ароматный, чем арабика, который широко используется в пищевой промышленности в производстве растворимого кофе и других более дешевых кофе. Содержит в два раза больше кофеина, чем арабика (между 2 и 3, 5%). Обычно смешивают и жарят вместе различные типы зеленых кофе, чтобы найти хорошие вкусы и ароматы, предпочитаемые потребителями.

Кофе жареный представляет собой продукт, полученный обжариванием кофейных зерен. Такая обжарка перед применением кофе в пищу оправдывает себя, так как в свежее обжаренном кофе полнее выражен аромат. Аромат кофе

обусловлен комплексом эфирных масел и других летучих соединений, образующихся во время обжаривания.

Качество жареного кофе оценивают по органолептическим показателям: внешнему виду, степени обжарки зерен, их вкусу и аромату [144].

При оценке качества кофе особое значение придают результатам органолептической оценки напитка — кофейного экстракта.

Кофе натуральный растворимый по органолептическим показателям оценивают по следующим показателям: внешний вид, цвет, вкус и аромат. Он должен быть в виде порошка коричневого цвета, однородный по интенсивности. Вкус и аромат должны быть выраженными, с различными оттенками, свойственными натуральному кофе.

В таблице 1.1 приведены характеристики типичных органолептических свойств некоторых наиболее распространенных торговых наименований (сортов) кофе [64, 66].

Таблица 1.1.

Страна	Торговое наименование (торговый сорт)	Характерные органолептические свойства
Бразилия	Santos (Сантос)	Слабая кислотность, средняя консистенция, ровный сбалансированный терпкий вкус, часто с легкой приятной горчинкой и цветочным ароматом
Колумбия	Colombia Excelso (Колумбия Эк-сельсо)	Низкая и средняя кислотность, средняя и густая консистенция, тонкий вкус и аромат
Венесуэла	Caracas (Каракас)	Умеренная кислотность, слабая и средняя консистенция, винный привкус
Эквадор	Galapagos (Галапагос)	Средняя кислотность, средняя консистенция, характерный ореховый вкус, часто цветочный аромат и фруктовое послевкусие

Индия	Arabica Cherry (Арабика Черри)	Умеренная кислотность, средняя и густая консистенция, сбалансированный сладкий вкус, приятный аромат, шоколадные тона
Йемен	Arabian Mocha (Арабиен Мокко)	Высокая кислотность, густая консистенция, сбалансированный вкус с шоколадным послевкусием, богатый букет, включающий цитрусовые, фруктовые, винные ноты
Кения	Kenya AA (Кения Эй)	Выраженная кислотность, густая консистенция, цитрусовые и фруктовые оттенки, яркий индивидуальный букет, часто — винный привкус
Гватемала	Antigua (Антигуа)	Заметная цитрусовая кислинка, средняя и густая консистенция, хорошая сбалансированность. шоколадные и пряные ноты
Коста-Рика	Таггаги (Таррацу)	Выраженная приятная цитрусовая кислинка, средняя и слабая консистенция, насыщенный, мягкий вкус с ореховым послевкусием, хорошо сбалансированный аромат, фруктовые оттенки, часто — ванильные ноты
Мексика	Altura Mexican (Алтура Мекси-кэн)	Средняя кислотность, легкая и средняя консистенция, часто — шоколадные оттенки и немного резковатый вкус, придающий сорту индивидуальность
Никарагуа	Maragoguete Nicaragua (Марагожип Никарагуа)	Слабая и средняя кислотность, средняя консистенция, сбалансированный вкус, хороший аромат

1.2. Технологическое операции производства кофе

Технологический процесс производства любых кофейных продуктов осуществляют на специализированных комплексах оборудования для хранения, транспортирования и подготовки кофейного сырья [5, 127].

Процесс обработки жареного натурального кофе состоит из следующих основных операций на рисунке 1.1.

Прием и хранение зерно зеленого кофе (из растения), анализируется качества, чтобы определить, если он находится в пределах требуемых спецификаций для обработки; затем, оно временно хранится в бункерах. Чтобы освободить влажность зерна, она осуществляется в непрерывном движении, так что однородность всех частиц обеспечивается. На небольших предприятиях транспортировка зерен кофе ведётся автопогрузчиками, нории, конвейеры. На крупных предприятиях часто прибегают к помощи пневматической системы транспорта. Зеленые зерна кофе не имеют ни вкуса, ни аромата, вкусовой профиль создается во время обжарки.

Обжарка зерно зеленого кофе является одной из основных технологических операций при производстве натурального растворимого кофе, так как от режима обжарки кофейных зёрен зависят качественные показатели готовой продукции. Кофе жарят, мелют, варят и сушат. На стадии обжарки в кофейных зёрнах начинаются сложные биохимические и физические изменения.

На стадии измельчения, обжаренный кофе из бункера направляют в гранулятор, где кофе измельчается до состояния помола (порошок). В зависимости от сорта степень помола может варьироваться, поэтому предварительно оператор задает машине все необходимые параметры.

В процессе концентрации, кофе подвергается длительной высокотемпературной обработке под высоким давлением, чтобы осуществить максимальную экстракцию (варка). Измельчённый кофе загружают в экстрактор, где в течение 8 часов кофе экстрагирует. Для лучшей экстракции и

перехода кофе в твёрдую фазу в воду добавляют соответствующие присадки.

Сушка – это сушка экстракта кофе, определяющий некоторые качественные показатели готовой продукции. Например, влага должна быть удалена осторожно и последовательно, не слишком быстро, но и не слишком медленно. Если сушка происходит слишком быстро, велика вероятность, что она будет неравномерной. В то же время медленная, тщательная сушка позволяет добиться однородного содержания влаги. Слишком много тепла в процессе сушки (от механических сушилок или прямых солнечных лучей) может повредить клеточную структуру зерна кофе.

Для процесса упаковки, кофейные продукты поступает на линию упаковки и маркировки. Фасовка в стеклянные банки и мягкую упаковку полностью автоматизирована. Оператор задает необходимые параметры и контролирует процесс. Молотый кофе расфасовывается в вакуумные пачки, которые надежно сохраняет вкус и аромат, поскольку полностью исключает контакт кофе с кислородом [168].

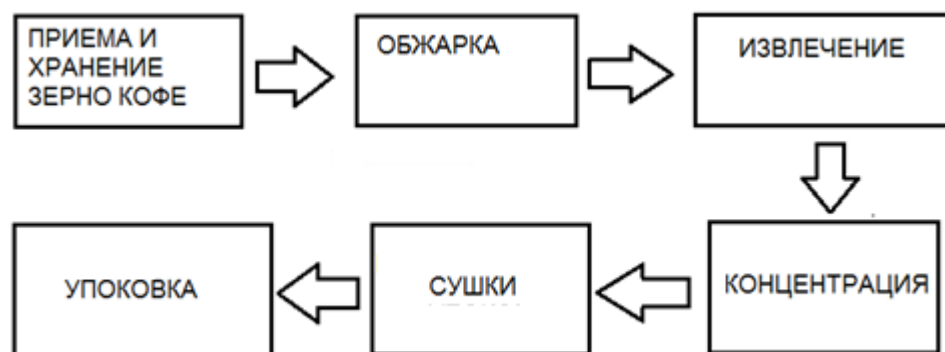


Рисунок 1.1. Процесс обработки кофе

Начальные стадии технологического процесса ТП производства кофе-продуктов выполняются при помощи комплексов оборудования для хранения, транспортирования и подготовки к производству кофе. Технологическая линия производства молотого кофе на рисунке 1.2, имеет:

1 – вибрационный сепаратор ; 2, 5 – бункер; 3 – обжарочный аппарат; 4 – охлаждающие чаши; 6 – фасовочный автомат; 7, 9 – камера ароматизации; 8 – гранулятор; 10 – ленточный транспортер; 12 – рассев; 13 – фасовочный

автомат; 14 – упаковочная машина. Технологическая линия производства молотого кофе работает следующим образом [7, 8].

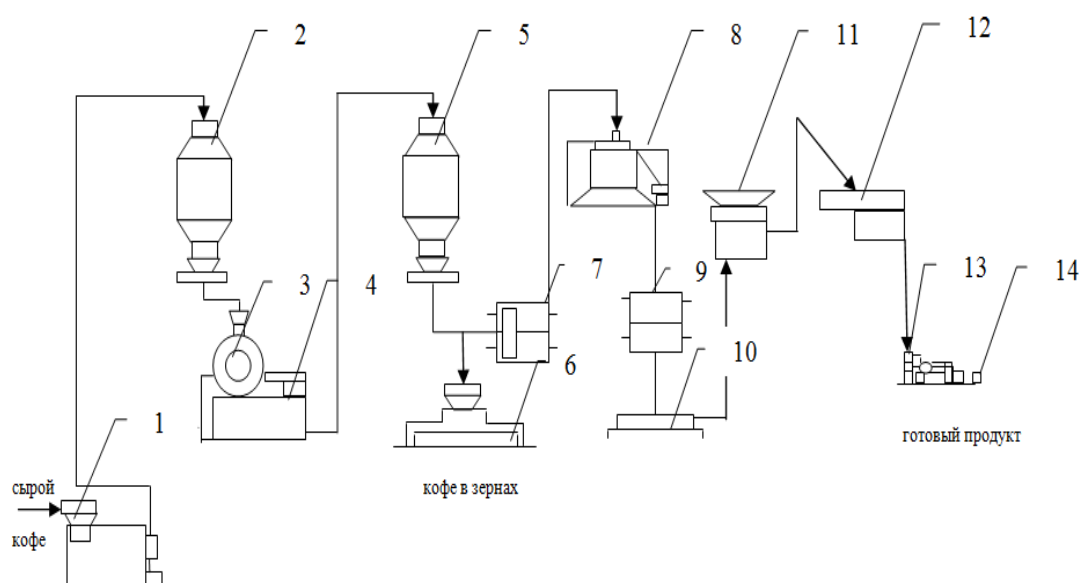


Рисунок 1.2. Машинно-аппаратурная схема технологической линии производства молотого кофе

Взвешенное кофе-сырье нагнетают пневмотранспортером низкого давления в вибрационный сепаратор (1), отделяющий примеси путем аспирации, просеивания и пропуска через магниты. Легкие примеси (пыль) отбираются вентилятором и осаждаются в съемных бочках циклонов. Вибрационный сепаратор (1) снабжен штампованными металлическими ситами с отверстиями следующих размеров (в мм): ловушка с овальными ячейками 9х16 или 13 х х16, сортировочное (проходное с ромбическими ячейками) 10 х 17, сходовое проволочное сито с квадратными ячейками 2х6 или 1,5 х 20.

Сырой кофе из вибрационного сепаратора (1) поступает в систему пневмоконвейера высокого давления и транспортируется потоком очищенного воздуха через распределителя в четырех- или шестисекционный бункер (2).

По окончании работы вибрационного сепаратора (1) убираются отходы из приемников и очищаются магниты.

Очищенные зерна кофе обжаривают в барабане обжарочного аппарата (3)

(процесс длится 14-15 мин при температуре от 210°C до 220°C) и охлаждают в охлаждающих чашах (4), дно которых выполнено перфорированным. Холодный воздух протягивается вентилятором снизу через слой кофе, который благодаря перемешивающим лопаткам и потоку воздуха находится в псевдооживленном состоянии, охлаждаясь в течение 10 мин.

Увлажнение кофе после обжаривания непосредственно в обжарочном аппарате (3), осуществляемое также автоматически по заданной программе, преследует цель — повысить влажность зерна кофе для более быстрого охлаждения, предотвращения сгорания мелкой фракции и уменьшения пылевидной фракции при последующем размоле.

Охлажденные зерна кофе загружаются в бункере (5) по секциям в зависимости от сорта и вида. Зерна кофе в целом виде фасуют в пакеты или жестяные банки на фасовочном автомате (6).

Кофе направляется в первую камеру ароматизации (7), где происходит его ароматизация с помощью основного ароматизатора на водной основе. После завершения процесса ароматизации ароматизированный кофе направляют для размалывания на гранулятор (8), который состоит из пяти валков, три из которых предварительно измельчают кофе, а два доводят частицы продукта до требуемых размеров. Далее уже измельченный кофе направляют во вторую камеру ароматизации (9), где происходит его ароматизация с помощью дополнительного ароматизатора на спиртовой основе и выдерживание для закрепления ароматических веществ.

Далее кофе инспектируют на ленточном транспортере (10) и рассеивают на рассеве (12). Готовый ароматизированный молотый кофе направляют на фасовочный автомат (13). Фасованный в пачки или банки кофе упаковывают в коробки на упаковочной машине (14).

Установленная в схеме первая камера ароматизации позволяет ароматизировать кофе в зернах путем обработки зерен основным ароматизатором на водной основе. Это обеспечивает закрепление частиц ароматизатора на поверхности частиц кофе, повышение степени его

ароматизации и получение натурального ароматизированного молотого кофе высокого качества [9-15].

На рисунке 1.3., показывается схема процесса производства натурального и зернового кофе. Когда речь не идет об огромном количестве, не требует специально оборудованного помещения.

Однако есть свои производственные нормы, которые обязательно необходимо соблюдать [47, 48]. Чтобы хранить сырой кофе на 30 кг зерна необходимо помещение в 15 метров квадратных. Помещение для фасовки готовой продукции также должно быть не менее 15 метров квадратных. Особенное внимание тут надо уделять дозатору и упаковочному автомату.

Правильность выбора того или иного упаковочного оборудования, в первую очередь, зависит от конструкции дозатора и характеристик дозатора [90, 146, 147].

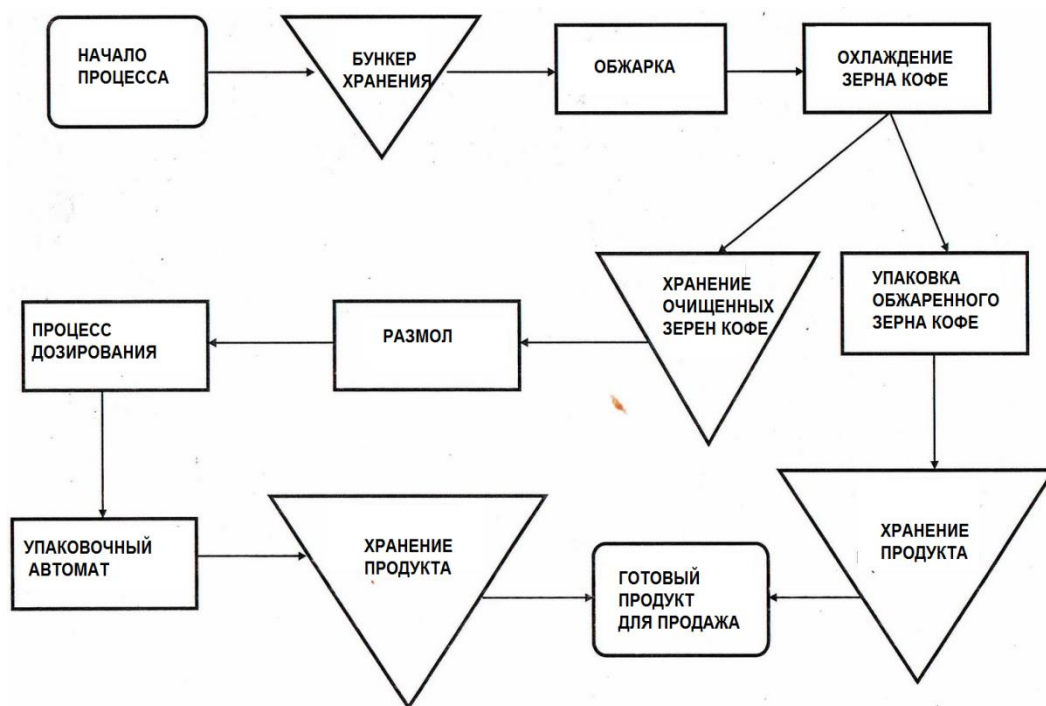


Рисунок 1.3. Блок-схема процесса производства молотого обжаренного натурального и зернового кофе

1.3. Анализ процесса дозирования молотого кофе.

Характеристика молотого кофе. Выбор факторов, определяющих эффективность этого процесса

Процесс дозирования молотого кофе (ДМК) непосредственно зависит от его физико-механических свойств, поэтому их особенности имеют решающее значение при выборе всего комплекса дозирующих устройств.

ДМК является важной частью производства, так как от точности дозирования зависит качество продукта, очень трудно точно дозировать вручную, поэтому на производствах применяются различные типы дозаторов.

В процессах ДМК степень подвижности частиц имеет основное значение и зависит от его характера истечения из бункера, подачи продукта на рисунке 1.4., из бункера продукт вытекает в дозирующее устройство по принципу дискретного дозирования. В системе дозирования, дозаторы обеспечивают выдачу заданной порции молотого кофе (МК), и дозировать в заданной временной и логической последовательности [97].

Наибольшую эффективность в процессе дозирования молотого кофе дает использование автоматических регуляторов, которые компенсируют влияние внешних факторов, такие как плотность, позволяют не отклоняться от заданной программы, а так же обеспечивают интуитивно-удобное управление и предоставление оператору отчетов о технологическом процессе дозирования молотого кофе.

Характерные недостатки при процессе дозирования молотого кофе, присущие бункерам различной формы дозатора — это образование статических сводов над выпускным отверстием, отложение молотого кофе на стенках бункера и образование вертикально движущегося столба в процессе истечения над отверстием, в то время как окружающий этот столб материал представляет собой застойную зону. Застойная зона или сводообразование прекращает временно или полностью истечения молотого кофе в дозирующее устройство.

Размеры и форму бункеров выбирают в зависимости от текучести

молотого кофе. Поэтому, в ряде случаев, при проектировании выбор оптимальной конструкции бункера объемного дозатора для конкретного вида кофе базируется на повторении удачной конструкции, оправдавшей себя на практике [41, 108, 111].

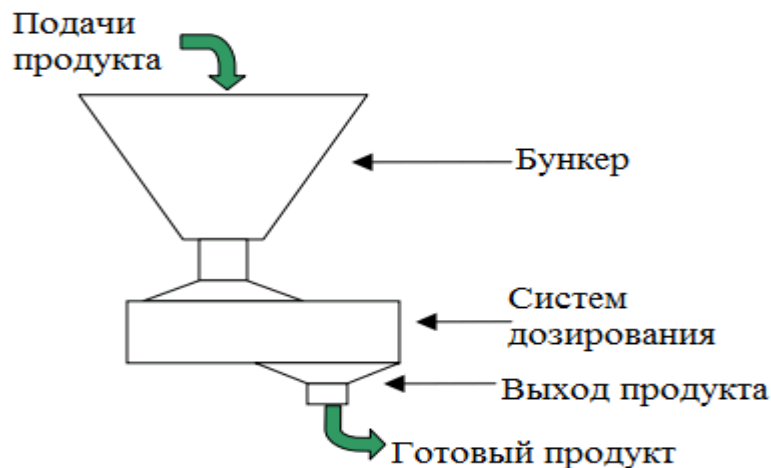


Рисунок 1.4. Процесс дозирования МК

Во многих случаях бункер рассчитывают на статические нагрузки при требуемом объеме, а форму его задают на основе технической интуиции без учета закономерностей истечения молотого кофе в процессе эксплуатации [73]. Для дозирования молотого кофе применяют автоматические весы и объемные дозаторы [145].

Кофе имеет определенные физические и механические свойства, и их поведение как сыпучей массы зависит от свободы истечения, размера и формы частиц, плотности, угла естественного откоса, внутреннего и внешнего трения, сцепляемости, влажности, электрического заряда и т.д. [6, 100, 101].

Размер и форма частиц

Чтобы представить размер частицы неправильной формы молотого кофе одним показателем, наиболее часто используют «средний размер». Однако частицы различного размера молотого кофе, которые имеют одинаковый «средний размер», могут проявлять совершенно, различные характеристики при обработке и транспортировке.

Плотность и объемная плотность

Плотность гранулированного молотого кофе представляет собой плотность, определенную без учета влияния любого сжатия продукта. Это положение имеет место, например, при плотной укладке гранулированного молотого кофе в небольшом контейнере. Очевидно, что объемная плотность зависит от состояния молотого кофе, т. е. плотности частиц, формы частиц и от укладки или расположения частиц относительно друг друга. Однако со временем в результате переориентации или оседания воздух выходит из сыпучей массы, уменьшается объем, занимаемый данной массой, и увеличивается объемная плотность.

Объемная плотность или насыпная плотность молотого кофе является массой единицы объема свободно насыпанного молотого кофе в какую-либо емкость непосредственно после ее заполнения. В объем молотого кофе входят внутренние поры частиц и промежуточное пространство между ними, заполненное газом.

Угол естественного откоса

Угол естественного откоса говорит нам о расходе молотого кофе, который тесно связан с фрикционным материалом.

Как угол приближается к нулю, расход очень хороший; если больше чем 45 градусов, то плохо будет двигаться материал в бункере. Это говорит о том что, чем меньше угол естественного откоса, тем легче истечение молотого кофе из бункера. Практика показывает, что при заполнении бункера на угол естественного откоса также влияют высота падения, скорость заполнения и производительность заполнения. Угол естественного откоса молотого кофе приблизительно равен минимальному углу внутреннего трения этого продукта.

Коэффициент внешнего трения молотого кофе об ограждающие конструкции соответствует тангенсу угла, отражаемого прямой с осью абсцисс в состоянии покоя молотого кофе.

Трение молотого кофе (внутреннее и внешнее)

Различают два вида трения, а именно: внешнее трение, которое

представляет собой трение зерна о стены бункера, и внутреннее трение — трение зерен друг о друга. Продукты, обладающие плохой сыпучестью, характеризуются более высоким коэффициентом внутреннего трения и более сильным сцеплением, чем продукты с хорошей сыпучестью. Молотый кофе обладает плохой сыпучестью (трудно-сыпучий материал).

Точные величины коэффициентов трения о стены и внутреннего трения молотого кофе были получены экспериментальным путем в специализированных лабораториях кафедры автоматизации технологических процессов автором.

Гранулометрический состав

Характеризуется количественным распределением частиц составляющих сыпучие материалы по крупности.

Гранулометрический состав молотого кофе может быть выражен в виде дискретной зависимости содержания частиц от их размеров частиц. Для определения дискретной зависимости интервал размеров всех частиц анализируемого молотого кофе подразделяют на классы (фракции) и гранулометрический состав представляют в виде процентного содержания частиц каждой из фракций (фракционный состав). Величина фракции показывает содержание в частицах молотого кофе в интервале размеров, ограничивающих фракцию.

Влажность

Знание содержания влаги на различных стадиях производства кофе является одним из ключей к контролю качества и стоимости. Поскольку кофейные зерна продаются по весу, содержание воды в этом продукте является особенно важным элементом в стоимости.

Повышенная влажность сырого кофе (более 14%) приводит к плесневению и порче. Оптимальной влажностью сырого кофе считают 10–12%.

Влажность кофе может быть распределена неравномерно по объему или поверхности. Влажность может изменяться либо добавлением влаги, либо путем сушки. Она влияет на текучесть, плотность молотого кофе [119].

Проведенные нами и описанные в п.1.1 исследования позволили выбрать факторы, определяющие эффективность процесса дозирования молотого кофе и его типовые операции на таблице 1.2.

Таблица 1.2.

№ п/п	Наименование типовой операции	Определяющие факторы, зависящие от:		Наличие операций в схемах производства молотого кофе/ показатели материала после операции
		работы технологического оборудования	свойств молотого кофе	
1	Подачи	Производительность, кинематические и конструктивные параметры оборудования/скорость	Масса, влажность, вязкость, гранулометрический состав, плотность, прочностные свойства и т.д.	+
2	Хранение	Кинематические и конструктивные параметры бункера	Уровень, влажность, гранулометрический состав, плотность, коэффициент истечения, гранулометрический состав прочностные свойства и т.д.	+
3	Дозирование	Производительность, кинематические и конструктивные параметры	Масса, влажность, вязкость, гранулометрический , состав, консистенция,	+

		стаканчикового дозатора/скорост ь, интенсивность, класс точности	плотность, прочностные свойства и т.д.	
4	Упаковка	Производительность, кинематические и конструктивные параметры оборудования/ско рость, интенсивность, класс точности	Масса, прочностные свойства и т.д.	+ Объем массы молотого кофе в упаковке,

Полученная таблица является основой разработки функционально - структурной схемы (ФСС) влияния факторов на процесс ДМК, где описываются промежуточные операции, и позволяет выявить факторы, влияющие на состояние МК на рисунке 1.5.

В процессе подачи МК (1) на показатели эффективности питателя оказывают влияние такие режимные параметры, как скорость привода питающего оборудования (ω_1), масса МК (m_i).

Когда материал находится в бункере дозатора при хранении МК (2) появляются новые факторы, которые влияют на процесс истечения МК и на качество продукта при процессе дозирования и эффективности упаковки.

Рассматриваются такие параметры как ускорение свободного падения (g), размер частиц (μ). Радиус выпускного отверстия бункера (r), влажность (W) и плотность молотого кофе (ρ), а также коэффициент истечения (Cd) и коэффициент трения (f'_w) являются основными свойствам при истечении молотого кофе из бункера объемного дозатора в процессе дозирования [95, 96, 99].

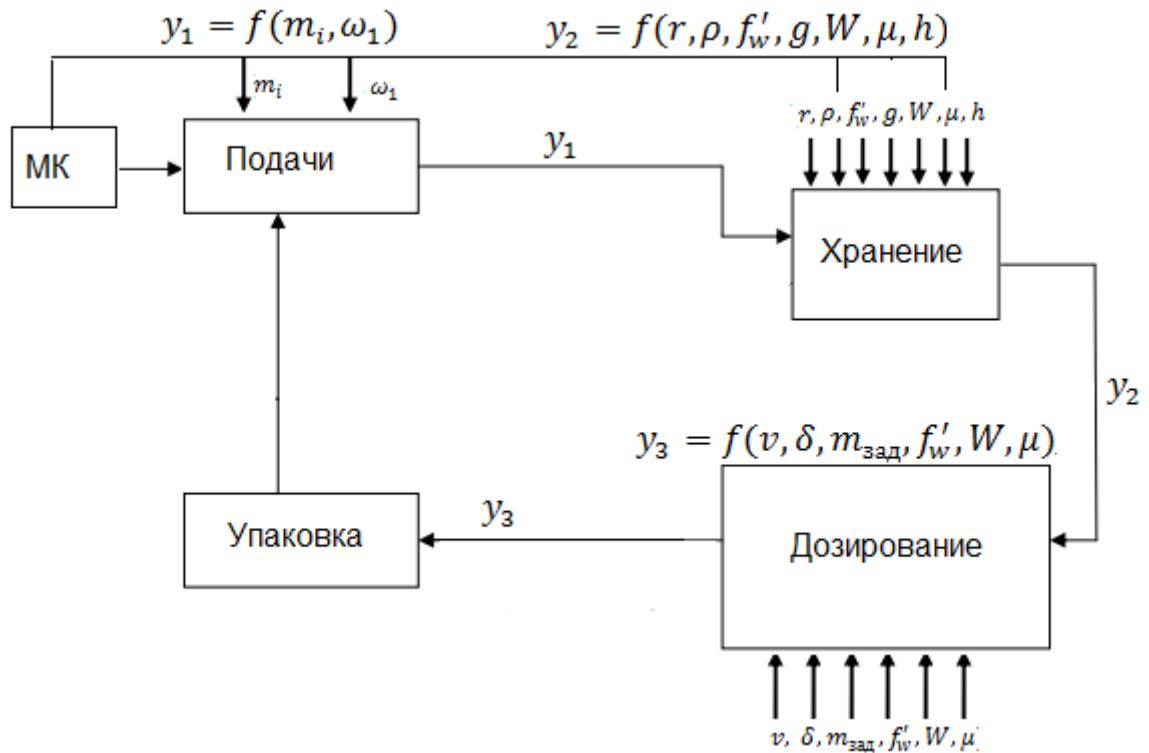


Рисунок 1.5. Функционально-структурная схема влияния факторов промежуточных операций при процессе ДМК

При процессе ДМК (3), рассматриваются также скорость истечения МК из бункера, погрешность дозатора (δ), заданная масса (объем) МК ($m_{\text{зад}}$).

1.4. Анализ информативности параметров качества зерен кофе (сырья), готовых зерен кофе и размолотого кофе. Выбор из них контролируемых и регулируемых

На состояние перерабатываемого сырья (зерен кофе) оказывают влияние множество самых различных факторов как физико-химическим показателям: влажности (при выпуске — не более 4%, в течение срока хранения — не более 7%); массовой доли золы, в том числе нерастворимой в соляной кислоте; массовой доли экстрактивных веществ (20—30%, а для молотого с цикорием — 30—40%), кофеина (не менее 0,7% в натуральном кофе и 0,6% в кофе с

добавлениями цикория); крупности помола, наличием металлопримесей (до 5 мг на 1 кг) и других посторонних примесей [98].

Содержание токсических элементов, афлатоксина В1 и пестицидов в натуральном жареном кофе не должно превышать допустимые уровни, установленные органами Госсанэпиднадзора (ГОСС).

Основные параметры качества натурального растворимого кофе являются физико-химическим показателям, которые определяют: массовую долю влаги, кофеина, золы, рН, полную растворимость, массовую долю металлопримесей и посторонние примеси. При этом влажность растворимого натурального кофе при выпуске должна быть не более 4%, в течение гарантийного срока хранения допускается увеличение до 6%; содержание кофеина — не менее 2,3%; общей золы — не менее 6%; рН напитка — не менее 4,7; растворимость в воде — полная в горячей за 0,5 мин, при 20°C — за 3 мин); количество металлопримесей — не более 3 мг/кг; а посторонние примеси не допускаются. Содержание токсических элементов, афлатоксина В1 и пестицидов не должно превышать допустимые уровни, установленные органами ГОСС.

Для определения контролируемых и регулируемых параметров в нашем примере рассматривается именно процесс дозирования.

Процесс дозирования и упаковки кофе являются заключительными стадиями производства, и отклонения времени нахождения продукта на этих участках может привести к сортированию влаги и нежелательных примесей из атмосферы производственного здания. Поэтому для стабилизации органолептических показателей продукта необходима минимизация времени дозирования и упаковки, требующая рассмотрения при управлении процессом дозирования времени нахождения кофе в бункере дозатора.

Для обеспечения стабильности протекания процессов ДМК, оптимизации режимов работы технологического линий производства МК необходима достоверная, своевременная и в то же время не избыточная информация именно об основных параметрах, оказывающих наибольшее влияние при процессе

ДМК. Таким образом, важнейшей задачей является определения контролируемых технологических параметров при процессе дозирования [148].

Как было показано в п.1.3, технологический аппарат производства (ТАП) при процессе подачи, хранения, дозирования и упаковки МК, контролируются по качеству на всех операций. Изучив принцип работы технологической линии производства МК, была составлена таблица 1.3 контролируемых технологических параметров, характеризующих состояние процесса производства МК, измеряемых автоматически существующей на предприятии АСУТП.

Таблица 1.3.

Операции процесса производства МК	Наименование объекта автоматизации	Наименование контролируемого технологического параметра	Единица Измерения
Подачи	Привод питателя	Угловая скорость, ω_1	Рад/сек
Хранение	Бункер	Промежуточный координат (Уровень), h	м
		Влажность МК, W	%
		Коэффициент истечения, Cd	
		Плотность МК, ρ	кг/м ³
Дозирование	Объемный дозатор	Угловая скорость, ω_2	Рад/сек
		Расход МК, q_2	м ³ /с
Упаковки	Технологический фасово-упаковочный аппарат	Производительность, Q	Упак/мин

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 относительная влажность $79.87\% \pm 1.05\%$ [185].

1.5. Современные методы контроля показателей качества при производстве молотого кофе

Для каждой операции существует какой-либо критерий качества. При производстве МК, современными методами контроля показателей качества являются определенное качество продукции, максимальная выгода или производительность или один из многих других параметров оценки. Схема регулирования производственного процесса ДМК с внедренным в него контролем качества проиллюстрирована на рисунке 1.6 [49-51].

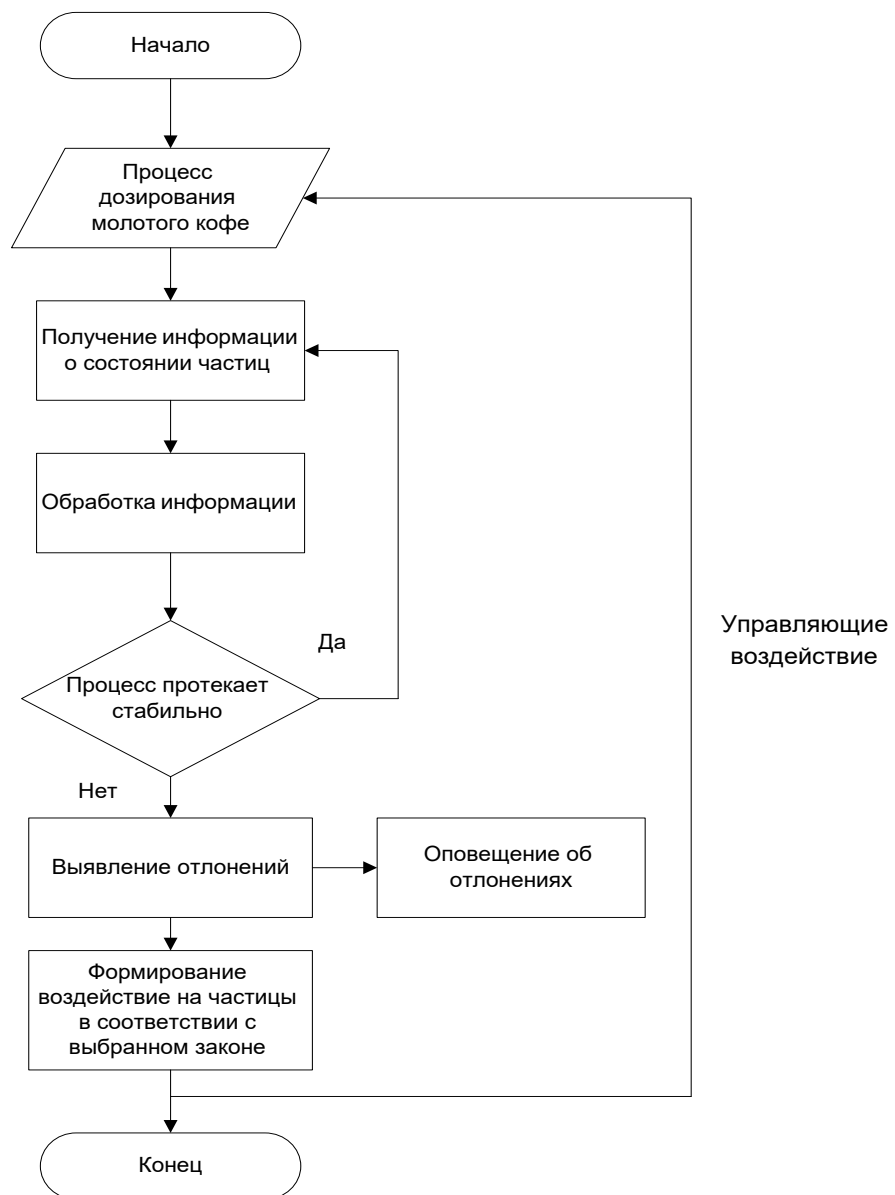


Рисунок 1.6. Схема управления на основе контроля качества процесса ДМК

Задачей системы автоматического регулирования (САР) является поддержание переменных параметров контроля качества МК на таком уровне, чтобы выходной параметр при процессе дозирования находился внутри области значений, диктуемых критерием качества регулирования [80].

1.6. Обзор и анализ существующих современных инструментальных методов и средств контроля основных показателей качества зерен кофе (сырья), готовых зерен кофе и размолотого кофе.

Анализ полученной функционально-структурной схемы (ФСС) влияния факторов промежуточных операций при процессе ДМК (рисунок 1.7) показал, что наиболее важными показателями качества кофе, готовых зерен кофе и размолотого кофе, которые необходимо контролировать в процессе дозирования являются: промежуточный координат (уровень), плотность, коэффициент истечения, скорость дозатора и скорость привода питателя.

Промежуточный координат молотого кофе, готовых зерен кофе также считается уровень сыпучего материала в бункере объемного дозатора. От величины уровня МК в бункере объемного дозатора зависит его стабильности истечения при процессе ДМК. Техника определения данного показателя позволяет определить параметрические переменные величины уровня. На рисунке 1.7., рассматриваются бункер имеющий форму конуса и параметрические переменные величины уровня, и радиусы при истечении МК.

$R_0, R_1, R_0'', R_0', r_1, r_2$ – Переменные значения радиусов бункера при истечении МК, h, h_0, h_2, h_1, h_f , – величины уровня МК в бункере. Чтобы найти радиус площади промежуточного координата для стабилизации процесса истечения МК используется теорема треугольников, и получаем отношение параметров радиусов бункера и уровня МК.

$$\frac{R_0}{h_2 - h_1} = \frac{R_0'}{h - h_1}, \quad (1.1)$$

$$\frac{R_0}{h_2 - h_1} = \frac{r_2}{h_f - h_1} \quad (1.2)$$

Из уравнения (1.1), получаем радиус площади промежуточного координата.

$$R'_0 = \frac{R_0(h - h_1)}{h_2 - h_1} \quad (1.3)$$

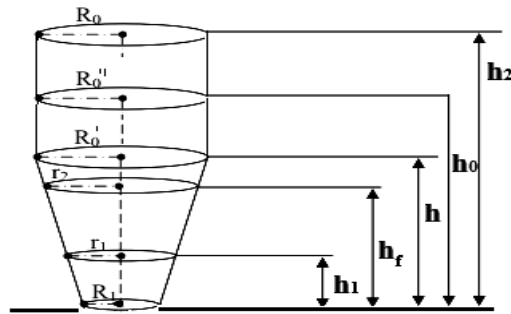


Рисунок 1.7. Параметрические переменные процесса управления уровнем молотого кофе.

В настоящее время обычно рассматривают в пищевых промышленности при процессе ДМК две точки величины уровня МК: максимальный и минимальный с помощью датчиков уровня.

Проведенные нами анализ метода контроля уровня позволили решить, что необходимо контролировать уровень МК еще в одной точке кроме максимального и минимального, а точнее посередине бункера объемного дозатора как промежуточный координат улучшает качеству дозирования, что в результате, возможно, контролировать и устранять сводов при истечении молотого кофе из бункера при процессе дозирования.

Таким образом, рассматриваются 3 точки величины уровня в бункере при процессе ДМК: максимальное значение h_2 , минимальное значение h_1 и значение промежуточного координата h . Каждые из этих трех точек величин уровня МК в бункере имеют разные радиусы при заполнении и истечении материала на рисунке 1.8.

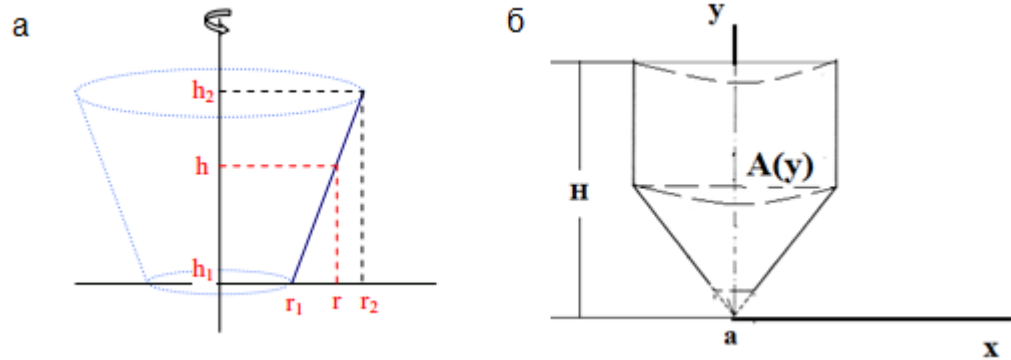


Рисунок 1.8. Основные параметры бункера. а. Изменение уровня Δh с разными радиусами Δr . б. Поперечная площадь A , высота бункера H , площадь отверстия выпуска МК, оси координаты x, y .

$r = f(h)$; $h_2 = h_1 = r_2 = r_1 = const$, уровень h меняется, когда радиус бункера r уменьшается при истечении МК. Тогда объем МК в бункере будет:

$$V = \pi \int_{h_1}^{h_2} [f(h)]^2 dh, \quad (1.4)$$

где, V – объем МК в бункере, dh – изменение уровня МК, $f(h)$ – функция от уровня.

При выборе датчика уровня МК необходимо учитывать физико-механические характеристики и свойства контролируемого материала [134].

Плотность МК

Насыпная плотность МК учитывает объем самих частиц, но и пространство между ними, таким образом, насыпная плотность меньше обычной плотности. При уплотнении молотого кофе, его плотность становится больше и перестает быть насыпной.

Все методы измерения плотности сыпучих материалов основаны на прямом или косвенном измерении массы и объема вещества в пробе, поэтому измерение плотности молотого кофе может осуществляться двумя путями:

1) косвенными методами, например, по затуханию потока радиоактивных, рентгеновских или ультразвуковых лучей, проходящих через контролируемое вещество;

2) абсолютным методом, когда масса и объем измеряются прямыми методами отдельно и по их отношению определяют плотность.

Известные методы позволяют получить надежный результат путем раздельного измерения объема и массы пробы молотого кофе с последующим делением полученных данных.

Коэффициент истечения при скорости истечения молотого кофе и для моделирования процесса дозирования является коэффициентом, зависящий от соотношения диаметра отверстия выпуска бункера и частиц молотого кофе.

Скорость привода питателя и скорость объемного дозатора

Жесткие требования к качественным показателям процесса движения многих технологических объектов определяют необходимость применения адаптивного управления исполнительными электромеханическими системами.

В технологическом процессе производства МК используются разные приводы в качестве исполнительных механизмов. Объемные дозаторы состоят из питателя, приборов и устройств, определяющих количество МК, пропускаемого и пропущенного через питатель, а также приборов регулирования.

Обеспечение заданных условий истечения молотого кофе реализуется посредством управления приводами параметрами электропривода системы ДМК. Специфичность электромеханических параметров электропривода процесса объемного дозирования проявляется в том, что эти параметры зависят от физико-механических характеристик дозируемого МК. Нестационарный характер возмущений технологических факторов процесса производства молотого кофе осложняет управление процессом дозирования в целом. Сложности настройки приводят к функциональным ограничениям процесса объемного дозирования, обусловленными уменьшением возможностей стабильной работы дозатора в требуемом диапазоне параметров дозирования молотого кофе.

Для контроля работа приборов, используется блок управления как модуль, на котором задаются параметры задания. Параметрами задания в

данном случае является производительность объемного дозатора, скорость привода питателя для подачи молотого кофе. Регулирование производительности осуществляется путем изменения скорости подачи, объема дозатора. Для подачи молотого кофе в бункер объемного дозатора выбран ленточный конвейер обеспечивающим приводом (двигатель М1) с постоянной скоростью. Двигатель М2 для привода объемного дозатора. Зависимости от функционирования ленточного конвейера, нуждается перенастроить скорость вращения привода питателя для режимов стартера, работы и остановка системы управления. Для скорости вращения привода подачи молотого кофе в бункер, определяется переходная характеристика входной зоны бункера дозатора при возмущении со стороны подачи молотого кофе и определяется значение задания, скорости вращения привода загрузочного конвейера [52, 67].

При заданной скорости вращения объемного дозатора (определяется заданной производительностью) оцениваются значения степени затухания и периода колебаний уровня при возмущении со стороны скорости истечения молотого кофе [31, 32, 40].

1.7. Состояние с автоматизацией процессов производства кофе в Эквадоре и в других странах

Кофе был завезен в Эквадоре в начале девятнадцатого века, и остается одним из главных экспортных культур Эквадора.

Эквадор производит кофе сорта арабика, в западных предгорьях Анд. Некоторые разновидности сорта робуста, используются для растворимого кофе, и выращиваются на севере страны. Эквадорский кофе можно охарактеризовать как хорошо сбалансированный, с превосходным ароматом. Отличительная черта эквадорской арабики — мягкость. Однако качество зерен невысокое из-за встречающейся иногда их острой кислотности. Страны производители кофе располагаются в тропических регионах с теплым и влажным климатом [78].

Автоматизированная технологическая линия процесса ДМК и фасовки в

производстве кофе в Эквадоре состоит из нескольких последовательно установленных технологических аппаратов (ТА), связанных ленточными и роликовыми конвейерами [84, 85].

Комплектация технологической линии включает в себя: устройство приема МК из исходного бункера шнекового дозатора; аспирационная система от фасовки/упаковки продукта с трубной обвязкой; фасовочно-упаковочный автомат (ФУА), в основе работы машины – FFS-технологии; пульт управления ФУА с ПЛК; ленточный конвейер (ЛК) наполненных мешков; металлодетектор; отбраковщик некондиционных мешков; тензовесы; роликовый конвейер-транспортёр отбракованных мешков; узел нанесения маркировки – принтер; ЛК наполненных, проверенных и промаркированных мешков; порталый паллетайзер (осуществляет укладку мешков на паллете); шкаф с пультом управления паллетайзером; диспенсер паллет (обеспечивает автоматическую подачу паллет из магазина); предохранительные устройства и ограждающие элементы паллетайзера; роликовый конвейер-транспортёр сформированных паллет; стрейчхудер; шкаф с пультом управления стрейчхудером; предохранительные устройства и ограждающие элементы стрейчхудера.

Дозировочная система ФУА в Эквадоре и в других странах спроектирована таким образом, чтобы исключить слеживание, отложения МК в любой из частей питателя (в т.ч. и в углах). Этим обеспечивается отсутствие остатков МК и отсутствие возможности его загрязнения.

Защита от попадания мельчайших частиц МК в воздух рабочей зоны обеспечивается встроенной системой аспирации воздуха рабочей зоны оснащенной фильтрующим элементом и приемным бункером отфильтрованных частиц МК, а также наличием защитных дверок и лючков.

Компактное исполнение питателя и использование весоизмерительной электроники последнего поколения гарантируют оптимальное взвешивание кофе в мешке и исключают возможный перерасход продукта. Каждый элемент линии оснащен собственной системой управления, обеспечивая легкость и простоту работы оператора установки.

1.8. Анализ дозаторов как базовой составляющей технологического процесса производства молотого кофе

В соответствии со структурой технологического процесса управлением дозирования молотого кофе, дозаторы делятся на дозаторы дискретного и непрерывного действия.

Непрерывное дозирование характеризуется подачей материала непрерывно и равномерно. Количество отдаваемого материала определяется либо скоростью, либо временем подачи, такие как конвейерные или шнековые дозаторы [1, 3].

Дискретное дозирование характеризуется выдачей заданного количества материала одной или несколькими порциями в течение определенного интервала времени.

Объёмные дозаторы дискретного действия (стаканчиковые) представляют собой мерные сосуды и измеряют массу пропускаемого молотого кофе по его объёму:

$$M = V \rho, \quad (1.5)$$

где M – масса молотого кофе, кг; V – объём молотого кофе, м³; ρ – насыпная плотность, кг/м³.

Расширенная классификация дозаторов представлена на рисунке 1.9. Первым слотом будет слот, отражающий конструкцию дозатора (шнековый, объемный, массовый). Одна из наиболее важных характеристик дозатора является точностью дозирования.

Под дозированием понимается отмеривание или отвешивание определенного количества (дозы) материала дозатором и перемещение этой дозы от дозатора к рабочим органам упаковочного оборудования. На точность дозатора оказывает влияние большое число факторов, в том числе колебания весоизмерительной системы, изменение физико-механических и свойств молотого кофе, поступающих в дозатор [122].

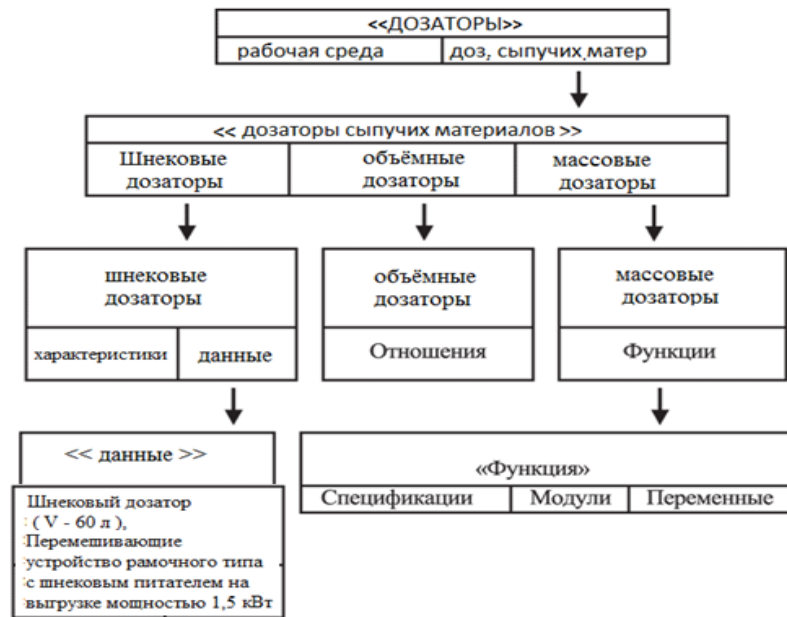


Рисунок 1.9. Классификация дозаторов сыпучих материалов

Правильность выбора того или иного упаковочного оборудования для производства кофе, в первую очередь, зависит от конструкции дозатора и характеристик дозатора [36-38, 129].

Весовой дозатор позволяет дозировать массы независимо от изменения объема массы продукта [72].

Весовой дозатор по правилам определяет массу нетто продукта, и поэтому масса дозы определяется до фасовки молотого кофе. [29]

При весовом дозировании используются весы двойного действия, которые располагают друг над другом, что позволяет производить два параллельных взвешивания. При двойном взвешивании грубое дозирование осуществляется с высокой скоростью и быстрым наполнением, а тонкое дозирование - с большей точностью. Производительность дозатора в зависимости от характера дозируемого продукта может быть 30...35 доз/мин.

В данной работе рассматриваются объемные дозаторы ротационного типа дискретного действия (стаканчиковый дозатор).

Стаканчиковый дозатор (СД) для молотого кофе отличается от других дозаторов тем, что является недорогой, простой по конструкции и надежный в работе. Такой дозатор можно установить на упаковочных машинах, как низкой,

так и высокой производительности. Объем дозы может изменяться путем увеличения или уменьшения расстояния между двумя дисками и при более крупном изменении дозы заменяются мерные стаканы. Регулирование дозы производится с помощью серводвигателя без остановки машины, часто прямо с места контроля массы молотого кофе. Применение в последние годы дистанционного управления значительно расширило границы применения стаканчиковых дозаторов на высокопроизводительных упаковочных машинах. На рисунке 1.10., рассматривается прием дозирования, при фасовке МК. Стаканчиковый дозатор СД молотого кофе имеет.

1. подготовительный бункер; 2. верхний лист; 3. верхний стаканчик; 4. нижний лист; 5. нижний стаканчик; 6. запорная заслонка; 7. воронка; 8. регулирование дозы; 9. упаковка.

Стаканчиковый дозатор выдает объемные порции молотого кофе с частотой, определяющей средний расход. С позиций теории автоматического управления передаточная функция стаканчикового дозатора определяется:

$$Wp(P) = ke^{-p\tau} \quad (1.6)$$

где k – коэффициент передачи; τ – время запаздывания.

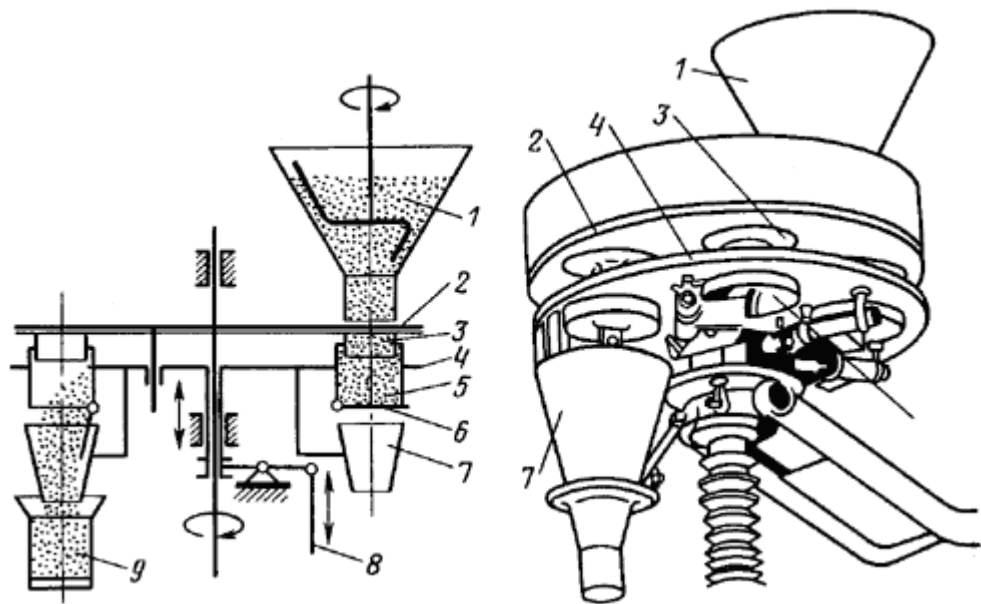


Рисунок 1.10. Роторный стаканчиковый дозатор

Принцип действия стаканчикового дозатора СД. Молотый кофе из загрузочного бункера поступает в предварительную камеру, где накапливается, а затем насыпается в мерные стаканы.

Плита с дозирующими стаканами вращается, при этом рычаги открывают или закрывают клапаны мерных стаканов.

Проходя под бункером ротора, стакан заполняется продуктом, после чего смещается. Дойдя до установленного места, клапан открывается, и продукт через воронку в основании попадает в промежуточный бункер, из которого далее поступает в упаковочный автомат. При этом необходимое количество продукта в бункере поддерживается датчиком уровня, установленным на кронштейне воронки. Из пищевой трубы фасовочно-упаковочной машины молотый кофе поступает в пакет. Порция молотого кофе регулируется путем изменения объема дозирующего стакана. Технические характеристики стаканчикового дозатора модель ТБ-080 описывается в таблице 1.4. [103].

Таблица 1.4.

Технические характеристики	
Диапазон дозирования, см ³	50 ... 1700
Производительность, доз/мин	до 60 упаковок
Емкость загрузочного бункера, дм ³	35
Привод дозатора	Электромеханический
Электропитание	220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность, Вт, не более	180
Габаритные размеры, мм	500x1060x900(Н)
Масса, кг, не более	80

Электродвигатель привода стаканчикового дозатора запитан через преобразователя частоты, с помощью которого подбирается требуемая скорость вращения дисков, время разгона и замедления.

Основные преимущества:

- высокая производительность;
- уменьшенная высота дозатора за счет верхнего расположения привода;
- простая и удобная регулировка объема дозы.

1.9. Параметрическая модель объемного дозатора молотого кофе

На начальном этапе синтеза законов управления переходят от описательных естественно-языковых представлений о процессе ДМК к математическим и алгоритмическим зависимостям, характеризующим связи набора выделенных параметров с процедурами переноса и преобразования дозируемой среды молотого кофе в пространственно-временном континууме технологического объекта (рисунок 1.11). Данная схема является обобщенной и содержит информации о конкретных значениях множеств и изменениях координатного пространства, описывающего систему управления, как и информации о структуре системы управления стаканчиковым дозатором. Для человека данные о возмущениях, коэффициентах настройки блоков управления и выходных управляемых переменных на начальной стадии необходимо сформировать в виде списков и таблиц [17-20].

Разброс количественных показателей доз на выходе стаканчикового дозатора обусловлен статистическим характером свойств дозируемого МК на входе стаканчикового дозатора СД. Неравномерность подачи, неоднородность состава молотого кофе зависят от свойств и сорта кофе и считаются как входные параметры на рисунке 1.8., такие как X_1 – размер частиц, X_2 – расход молотого кофе, $q_1[\text{м}^3]$, также X_3 – коэффициент истечения, Cd , X_4 – влажность, $W[\%]$, управляющие воздействия U_1 – скорость подачи молотого кофе в бункер, $\omega_1[\text{рад/сек}]$, U_2 – скорость вращения стаканчикового дозатора, $\omega_2[\text{рад/сек}]$. Как выходные параметры рассматриваем Y_1 – производительность, Q [упок/мин], Y_2 – вес (объемный расход) молотого кофе, $q_2[\text{м}^3]$, Y_3 – уровень молотого кофе в бункере, h [м]. В качестве

возмущающих факторов рассматриваются: $Z1$ — изменение плотности, $\rho[\text{кг}/\text{м}^3]$, $Z2$ — изменение коэффициента истечения, Cd , $Z3$ — изменение скорости вращения стаканчикового дозатора $\omega_2[\text{рад}/\text{сек}]$.

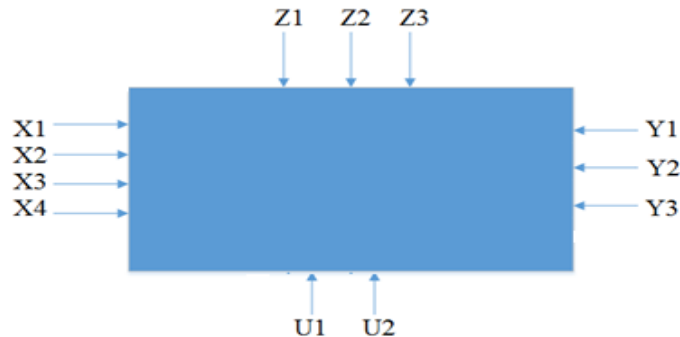


Рисунок 1.11. Параметрическая модель объекта управления

1.10. Системы управления дозаторами

Наибольшая эффективность использования дозаторов достигается, если регулятором или его основой служат микро–ЭВМ, позволяющие компенсировать влияние внешних возмущающих воздействий (например, параметров технологического режима скорости подачи и скорости дозатора), вести дозирование по заданной программе, удобно представлять информацию оператору и передавать результаты дозирования (например, общий объем прошедшего молотого кофе) на следующий уровень управления [23, 33, 34].

Управляющий контроллер рассчитывает текущую производительность СД и при необходимости, формирует корректирующий сигнал на регулируемый частотный привод (рисунок 1.12).

Система управления СД для молотого кофе обычно предусматривает три уровня: уровень обработки данных, шкаф контроля и управления, непосредственно включает дозатор как составную часть исполнительного механизма (ИМ) [124, 53, 54].

При анализе с точки зрения двухуровневой цели управления следует отметить, что теоретические модели, связанные с расчетом режимов движения молотого кофе, не нашли практического применения в программном

обеспечении, используемом при работе с контроллерами для управления дозатором стаканчикового типа.

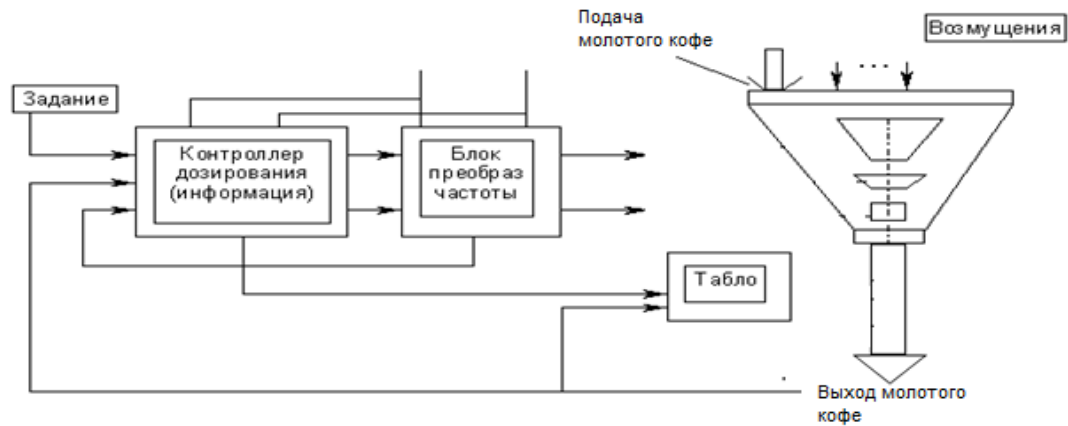


Рисунок 1.12. Пример структуры системы управления дозатором

Современное программное обеспечение верхнего уровня для работы с приборами рассматриваемого класса не позволяет представлять процесс движения среды в бункере за исключением отображения на мониторе мнемосхемой с имитацией заполнения бункера объемного дозатора.

Возможность визуализации заполнения бункера и появления в нем застойных зон на ЭВМ верхнего уровня ограничивается тем, что техническая реализация канала межуровневой связи в большей части приборов реализуется на основе интерфейса RS485 и протоколов Modbus.

Контроллеры, используемые, для управления процессами дозирования молотого кофе показывается в таблице 1.5. Применение полевых шин еще не получило широкого применения, хотя есть отдельные примеры, связанные с использованием в дозаторах общепромышленных контроллеров фирмы «Siemens» (проект холдинга «Агро-3», г. Санкт-Петербург) [126].

Для упаковки продуктов молотого кофе рассматриваются упаковочные автоматы, которые имеют уникальную самонастраивающуюся систему дозирования, обеспечивающую высокую точность и скорость работы.

В процессе упаковки порции молотого кофе производится в пакеты из мягких термосвариваемых пленок на основе полипропилена, полиэтилена и их

комбинаций с фольгой, бумагой, тканью и т.п. Упаковочный аппарат производит дозирование продуктов по объему и их полную упаковку в автоматическом режиме [26, 30]. Точность дозирования составляет 4-8%. Автомат может работать в одном из весовых диапазонов: 0,02 - 0,2 литра; 0,2 - 0,5 литра.

Таблица 1.5.

№	Тип прибора	Краткая характеристика
1.	Приборы серии Spido-X («Spiromatic», Бельгия)	Специализированные, используются в системах управления взвешиванием и дозированием компонентов. Имеют возможности контроля отклонения, реализации заданной рецептуры и управления конвейерами при перемещении продукта. Имеют коммуникационные порты RS232 или RS485. На верхнем уровне управления при работе с приборами применяется специализированная программа «Маэстро»
2.	Контроллеры управления дозатором КУД4/2 (НПК «Фазис», г. Ярославль, РФ)	Контроллеры для управления дозаторами различных принципов действия. Реализованы на базе контроллеров фирмы «Овен» (ПЛК100-220). Для отображения информации применяются панели оператора (ИП320). Имеют коммуникационные порты RS485. На верхнем уровне применяются среда CoDeSys и языки программирования стандарта МЭК 61131
3.	Комплекс управления дозатором (ООО «АС Автоматизация», г. Саранск, РФ)	Контроллеры для управления дозаторами различных принципов действия. Реализованы на базе общепромышленных контроллеров фирмы «Овен» (ПЛК 110-60). Для отображения информации применяются панели оператора (СП270). Имеют коммуникационные порты RS485 и RS232. На верхнем уровне применяются среда CoDeSys и языки программирования стандарта МЭК 61131
4.	Весовой терминал серии CAS (CAS	Специализированные. Предназначены для контроля предельного веса с хранением в памяти одного рецепта. Имеют дополнительные функции фильтрации и расчета усредненных характеристик. Имеют коммуникационные

	Corporation, Южная Корея)	порты для связи с ЭВМ с использованием интерфейсов RS232, RS422, токовая петля. Обеспечивают ведение протокола процесса управления и вывод его на принтер через интерфейс Centronics
5.	Контроллеры серии «РОСАТ» (НПФ «РОСАТ», г. Екатеринбург, РФ)	Специализированные. Осуществляют управление процессами дозирования как отдельных продуктов так приготовления смесей с хранением до 100 рецептов. Могут использоваться в составе АСУТП «ССД РОСАТ» со специализированным программным обеспечением
6.	Контроллеры серии «Мастер» (ООО «НПФ «ИнСАТ-СПб», г. Тосно, РФ)	Специализированные. Предназначены для управления процессами объемного непрерывного и дискретного дозирования сыпучих и жидких компонентов. Имеют возможности учета расхода порции и хранения данных об общем количестве расфасованного продукта. Контролируют состояние узлов не только дозатора, но и технологической линии. Управление приводом дозатора осуществляют с помощью унифицированного токового выхода. Имеют коммуникационные порты RS485

Фасовочно-упаковочный автомат в базовом исполнении на рисунке 1.13., имеет: Стаканчиковый дозатор СД; машина упаковочная автоматическая с гусеничной протяжкой; рама опорная силовая; термодатер - 6 знаков; фотодатчик; датчик длины пакета - энкодер; узел формообразования под указанную покупателем ширину пленки. Например, автомат фасовочно-упаковочный У-03СТ.

Система управления фасовочно-упаковочного автомата со стаканчиковым дозатором собрана на базе промышленного компьютера, цветной ЖК монитор с сенсорным управлением предоставляет удобный и интуитивно понятный алгоритм управления аппаратом. Автомат фасовочно-упаковочный У-03СТ укомплектован загрузочным комплексом (бункер-питатель БП-01 и загрузочный транспортер Т-01).

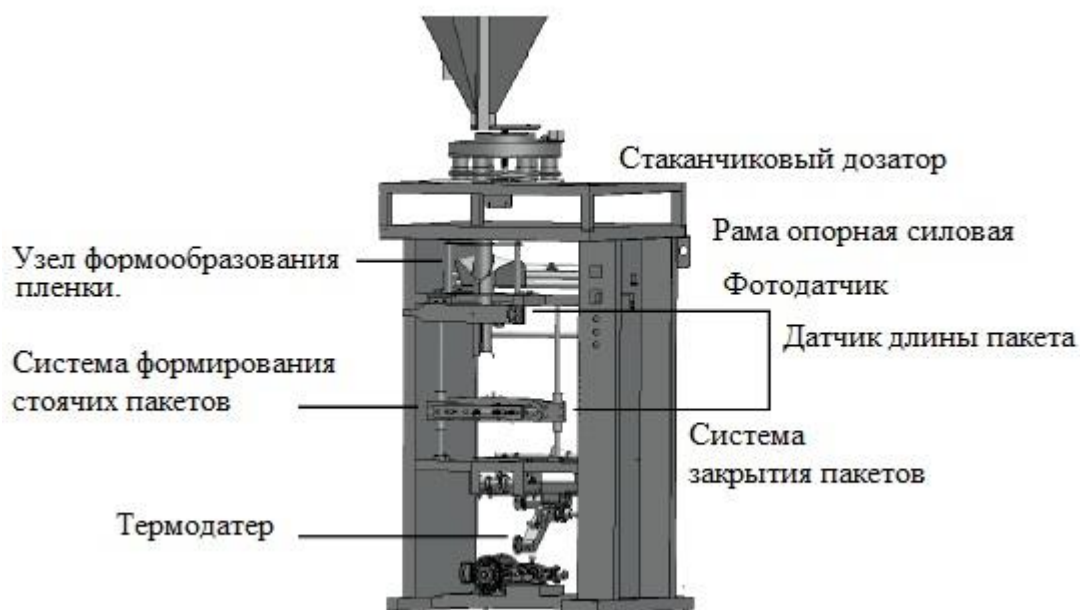


Рисунок 1.13. Пример фасовочно-упаковочного автомата со стаканчиковым дозатором.

Загрузочный комплекс оснащен автоматической системой контроля уровня молотого кофе в приемном бункере автомата.

1.11. Структура систем управления дозированием

Необходимыми элементами системы управления дозированием являются отмеченные датчики (источники информации), устройства управления оборудованием, блоки питания, средства контроля линий связи, устройства согласования интерфейсов, схемы защиты (для снижения потерь при авариях оборудования); к датчикам относится, например, оптический датчик определения уровня молотого кофе [18, 68-71].

Функционирование большинства существующих систем управления процессами дозирования молотого кофе направлено на достижение одноуровневой цели, связанной с обеспечением точности дозирования при заданной производительности технологической линии. Иногда осуществляется управление производительностью стаканчикового дозатора при наличии ограничений на точность и изменение качества продукта в упаковке.

Повышение метрологических характеристик дозаторов при компоновке их постоянно совершенствующимися весоизмерителями предоставляет возможности более точного измерения массы доз компонентов и косвенного влияния на качество дозированного молотого кофе. Одним из показателей качества молотого кофе, является дисперсия фракционного состава по упаковкам в пределах партии, выпускаемой из одного сырья.

Структуры системы автоматического дозирования молотого кофе представляется как четырёхуровневая система. На первом уровне определяется система автоматического дозирования (САД) на рисунке 1.14., обеспечивающая автоматическую выдачу заданного количества молотого кофе в последующие технологические аппараты с требуемой производительностью.

На втором уровне модели определяются функциональные устройства системы автоматического дозирования: А – устройство хранения кофе (УХК), обеспечивающее хранение запаса молотого кофе, необходимого для продолжительной работы системы автоматического дозирования, а также выдачу продукта в последующее устройство системы; В – устройство подачи кофе (УПК), служащее подачи молотого кофе в устройство хранения для начала процесса; С – устройство дозирования молотого кофе (УДК), осуществляющее формирование и выдачу дозы молотого кофе во внешнюю систему (технологическую машину) с требуемой производительностью; D – система управления (СУ), обеспечивающая информационных данных режимов работы системы автоматического дозирования, контроль происходящими процессами и синхронизацию работы отдельных функциональных устройств системы.

На третьем уровне модели располагаются функциональные механизмы и блоки управления, входящие в состав функциональных устройств системы автоматического дозирования. Функциональные механизмы служат для выполнения основных рабочих функций (операций) над материалом, а блоки управления обеспечивают соблюдение заданных режимов и синхронизацию работы функциональных механизмов [42].

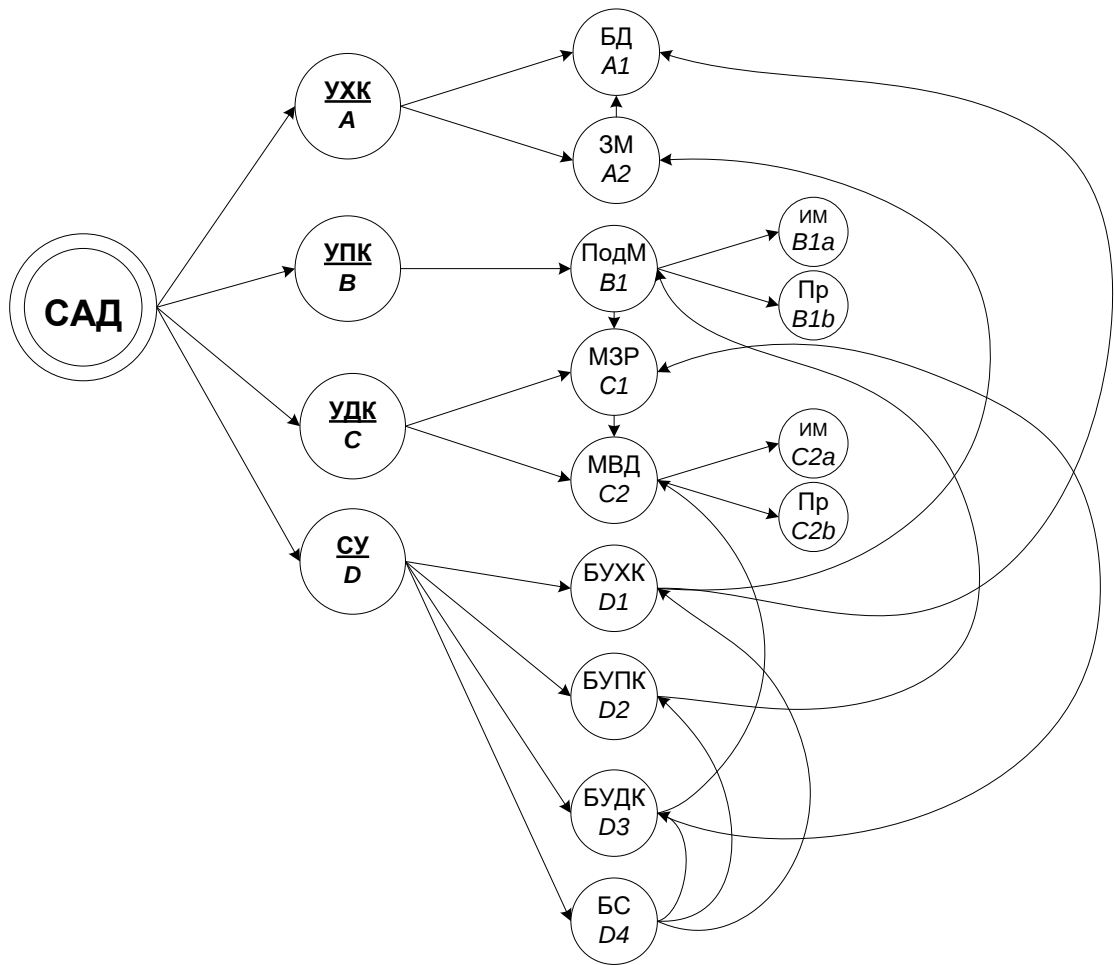


Рисунок 1.14. Иерархическая модель структуры системы
автоматического дозирования молотого кофе

Функциональные механизмы устройства хранения кофе:

A1 – бункер стаканчикового дозатора (БД), обеспечивающий хранение запаса молотого кофе;

A2 – затворный механизм (ЗМ), служащий для отпирания выпускного отверстия бункера стаканчикового дозатора и удержания молотого кофе.

Функциональный механизм устройства подачи молотого кофе:

B1 – подающий механизм (ПодМ), осуществляющий подачу молотого кофе в бункер стаканчикового дозатора.

Функциональные механизмы устройства дозирования молотого кофе:

C1 – механизм формирования дозы (МФД), обеспечивающий поддержание заданного расхода молотого кофе с требуемой точностью;

C2 – механизм выдачи дозы (МВД), осуществляющий транспортирование

и выдачу заданного количества молотого кофе с требуемой производительностью в фасовочно-упаковочный автомат (во внешнюю технологическую машину).

Блоки системы управления:

D1 – блок управления хранением молотого кофе (БУХК), служащий для контроля количества молотого кофе в бункере стаканчикового дозатора и управления приводами затворного механизмов;

D2 – блок управления подачей молотого кофе (БУПК), предназначенный для управления работой подающего механизма;

D3 – блок управления дозированием молотого кофе (БУДК), контролирующий и регулирующий процессы подачи, формирования и выдачи дозы;

D4 – блок синхронизации (БС), обеспечивающий синхронизацию работы всех функциональных механизмов и блоков управления системы.

Структурные связи САД молотого кофе:

B1A1– загрузка молотого кофе в бункер стаканчикового дозатора;

A2A1– запираание выпускного отверстия бункера;

C1C2– подготовка дозы к выдаче;

D1A1– контроль количества молотого кофе в бункере;

D1A2– управление приводом затвора стаканчикового дозатора;

D2B1– управление режимами работы питающего механизма;

D3C1– контроль и регулирование процесса формирования дозы;

D3C2– управление процессом выдачи дозы;

D4D1, D4D2, D4D3– согласование работы блоков управления.

На четвёртом уровне находятся исполнительные механизмы (ИМ) и приводы (Пр), входящие в состав функциональных механизмов, а также датчики блоков управления. Исполнительные механизмы (*B1a, C2a*) выполняют непосредственную технологическую функцию, а приводы (*B1b, C2b*) сообщают исполнительным механизмам необходимые кинематические движения и передают рабочую энергию.

1.12. Выводы по первой главы

1. Первая глава посвящена анализу технологической линий производства МК и процесс объемного дозирования как объект автоматизации. В рамках этой главы выявлены, обобщены, систематизированы и проанализированы особенности данного процесса, дана характеристика основных стадий и материальных потоков при производстве МК. Проведена классификация основных операций процесса ДМК и выбраны факторы, определяющие эффективность этих операций в целом.

2. В качестве объекта управления выбран стаканчиковый дозатор дискретного действия для процесса дозирования молотого кофе и рассматривается, как подход к автоматизации процесса дозирования для простого и недорогого решения, так как нет необходимости в высокой точности дозирования по сравнению с весовыми дозаторами.

3. Анализ процесса дозирования молотого кофе показал, что изменение, хотя бы одного из физико-механических свойств молотого кофе (влажность, гранулометрический состав и др.), неизбежно влияет на динамическое поведение и структурообразование продукта которые, в свою очередь, также оказывают влияние на процесс сводообразования при дозировании продукта.

4. Проведен всесторонний анализ параметров, оказывающих влияние на качество МК на ход каждой операции при процессе ДМК. На основании полученных результатов разработана ФСС влияния факторов промежуточных операций на качество МК на стадии процесса ДМК.

5. Рекомендуются 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 относительная влажность $79.87\% \pm 1.05\%$. Таким образом, особое внимание уделено такими влияющими факторами как коэффициент истечения, сопротивление сдвигу и плотность молотого кофе в процессе дозировании с учетом контроля уровня пищевого продукта.

6. 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.

7. Интенсивный рост объемов мирового производства молотого кофе привело к появлению в пищевой промышленности роторных систем автоматического дозирования, которые учитывает влияние транспортного вращения системы на характер движения молотого кофе в питателе и влияние скорости вращения привода дозатора, как следствие, на производительность стаканчикового дозатора, что требует проведения комплекса аналитических и экспериментальных исследований.

8. В задаче управления процессом дозирования молотого кофе на базе современных промышленных контроллеров позволяет реализовать высокий инновационный потенциал систем управления, который отражается: в возможности формирования трендов переменных состояния бункера на основе получения измерительной информации об уровне молотого кофе по всему пространству бункера объемного дозатора.

9. 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 СД. Была поставлена задача создания математическая модель процесса ДМК с использованием микро-ЭВМ и регулятора, позволяющие компенсировать влияние внешних возмущающих воздействий, такие как параметры технологического режима скорости подачи и скорости СД. Вести дозирование по заданной программе, удобно представлять информацию оператору и передавать результаты дозирования (например, общий объем прошедшего молотого кофе) на следующий уровень управления.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ДОЗИРОВАНИЕМ МК

2.1. Экспериментальное исследование дисперсного состава МК

Реальные дисперсные системы состоят, как правило, из частиц разного размера, поэтому при анализе процесса с полидисперсным молотым кофе должно быть известно распределение частиц по размерам, т.е. гранулометрический или зерновой состав МК. Определяется методами ситового, седиментационного, микроскопического и другими методами анализа [172]. Прямое измерение размеров частиц используют для определения гранулометрического состава в основном кускового, крупнозернистого, мелкозернистого и порошкообразного материалов. При этом методе частицы измеряют с помощью соответствующего измерительного инструмента, а мелкозернистые материалы с помощью инструментального микроскопа.

Перед измерением с помощью микроскопа порошкообразные материалы размешивают в глицерине, затем смесь переносят на предметное стекло и наносят его тонким слоем. Достоверные результаты определения размеров частиц молотого кофе могут быть достигнуты только путем измерения большого их количества. Если частицы имеют разную форму и размеры, то число измерений должно быть не менее 2000, поэтому метод непосредственного измерения считается трудоемким [113].

Традиционные методы исследования поверхности, такие как рентгеновская дифракция, дифракция медленных электронов, и электронная спектроскопия, позволяют получать усредненную по поверхности образца информацию о расположении атомов.

Растровая электронная микроскопия позволяет разрешать детали нанометрового масштаба, но не дает непосредственно информацию о высоте поверхностных деталей. Все эти методы работают только в вакууме.

Новые возможности открылись после изобретения Г. Биннигом и Х. Рорером (1981 г.) сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), позволившей экспериментально получить изображения поверхности с атомным разрешением, и атомного силового микроскопа (АСМ, Г. Бинниг и др., 1986г.), с помощью которого стало возможным изучать рельефные только проводящих, но и диэлектрических материалов. В рисунке 2.1, представлен микрофотографии элемента частиц молотого кофе с помощью зондовой микроскопии.

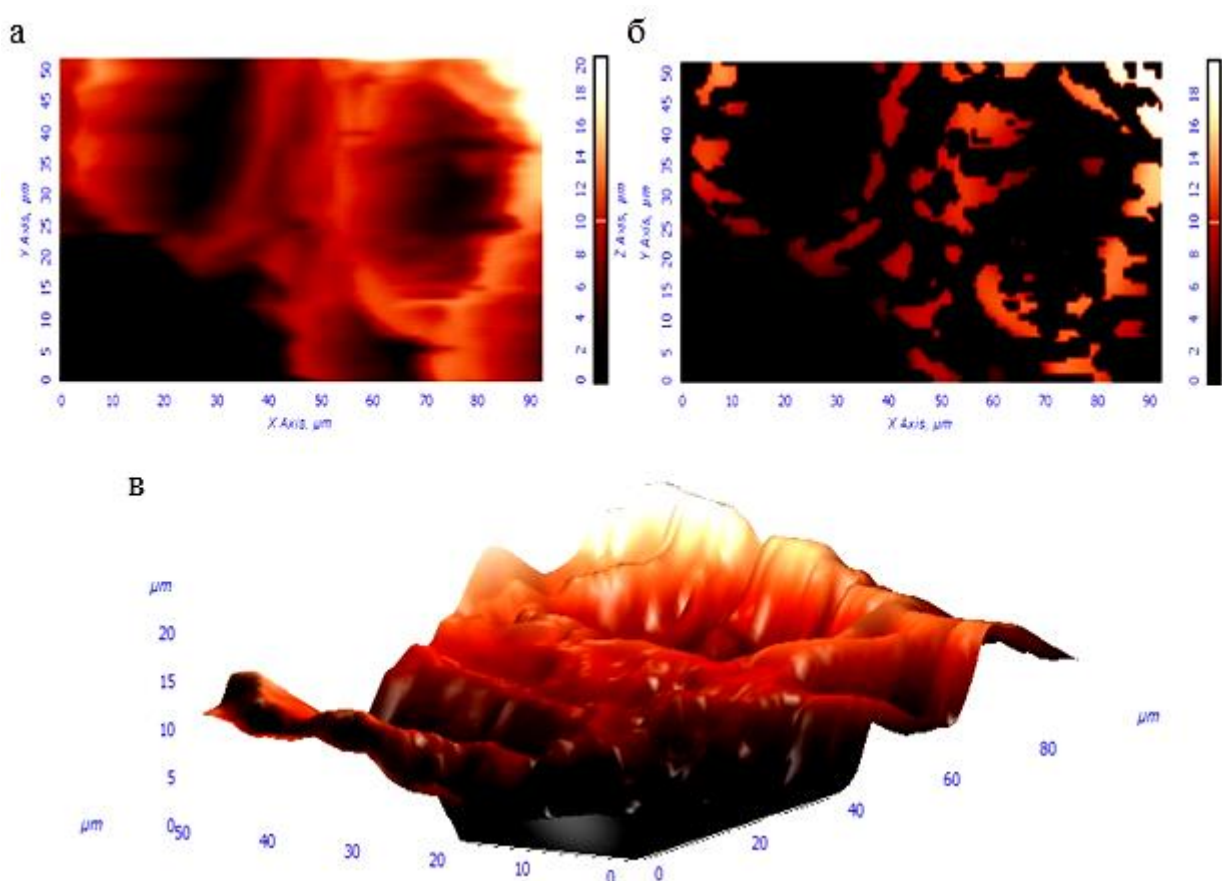


Рисунок 2.1. Способы графического представления частиц молотого кофе, а. 2D изображение частиц МК, б. Рельеф поверхности частиц, в. 3D изображение частиц МК

Для проведения исследования формы частиц молотого кофе, был использован сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) для учебных целей (NanoEducator).

СЗМ NanoEducator позволяет реализовать различные методы измерений туннельной и «полуконтактной» атомно-силовой микроскопий и может использоваться в научных целях при исследованиях в области физики и технологии микро и наноструктур, материаловедения, катализа, физики и химии полимеров, трибологии, цитологии и т. п.

В сканирующей зондовой микроскопии вместо зондирующих частиц применяется острый зонд, игла.

На рисунке 2.2 можно представить изображение разных частиц молотого кофе. Качество изображения по методам СЗМ определяется радиусом кривизны кончика зонда, что при неправильном выборе зонда или его повреждении приводит к появлению артефактов на получаемом изображении. На рисунках 2.3, 2.4 показаны результаты измерения размер частиц тонкого и среднего помола молотого обжаренного кофе.

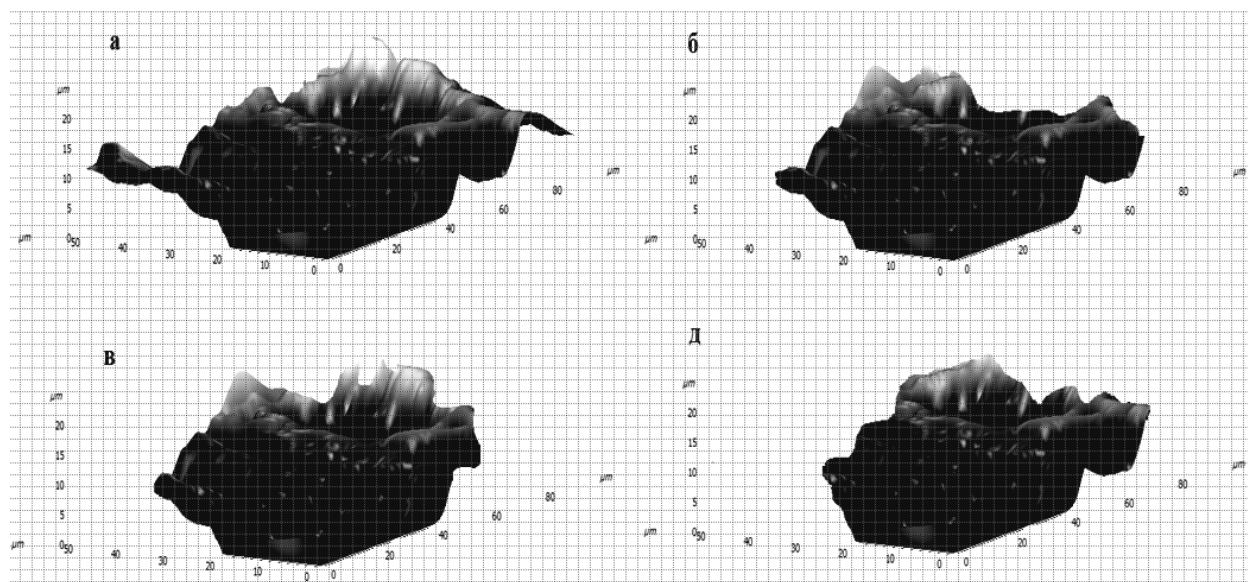


Рисунок 2.2. Электронные микрофото разных частиц МК по методике СЗМ

Результат эксперимента на зондовой микроскопии показал, что размер частиц тонкого молотого кофе имеет предел в диапазоне 0.200 μm на рисунке

2.4. Для измерения среднего диаметра частиц обжаренного молотого кофе по методике зондовой микроскопии был использован 0.2 до 0.5 грамм обжаренного молотого кофе. На рисунке 2.5 представляется размер частиц в процентах дисперсии среднего помола молотого кофе.

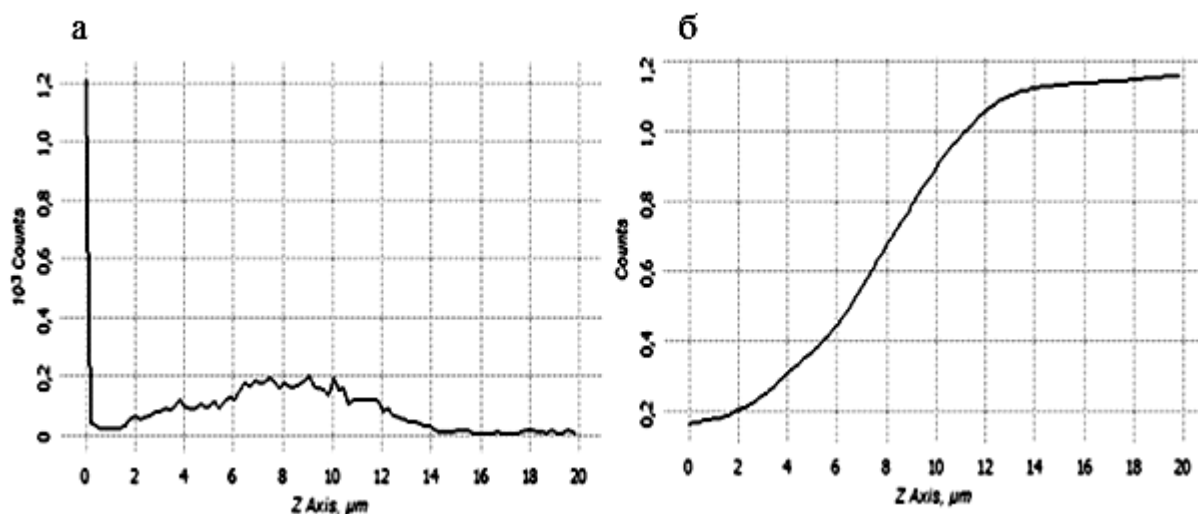


Рисунок 2.3. Плотности распределения состава фракций МК

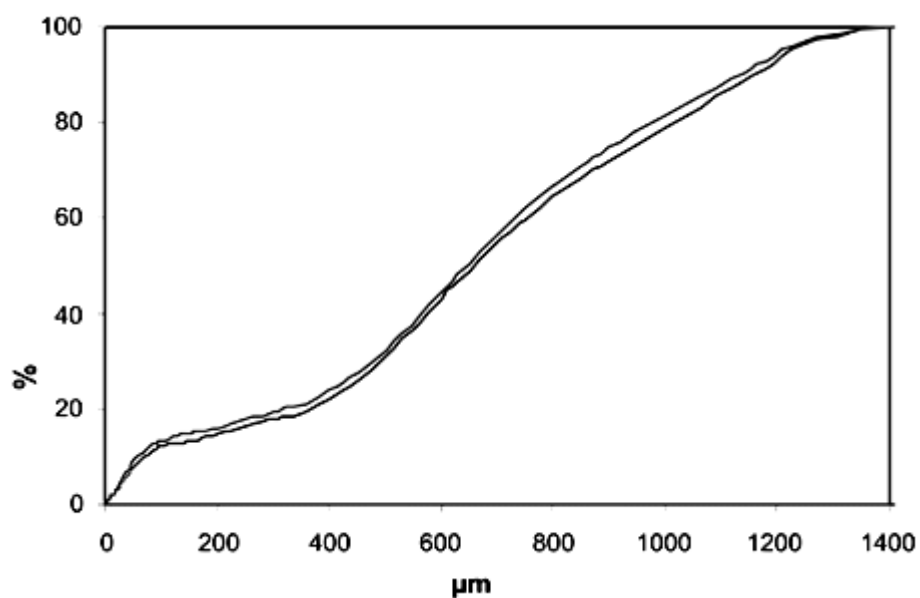


Рисунок 2.4. Размер частиц в процентах дисперсии среднего помола молотого кофе

2.1.1. Определение статистических характеристик размера частиц молотого кофе

Определение размеров частиц (гранулометрического состава) молотого кофе обычно осуществляется в широком спектре отраслей и зачастую этот параметр является критичным при производстве большого количества продуктов молотого кофе [114, 133, 167].

Розин и Раммлер, статистически анализируя гранулометрический состав измельченных продуктов, определили, что распределение масс частиц различных классов крупности описывается распределением Вейбулла. Выражения для плотности распределения $f(d_{\text{МК}})$ и функции распределения $F(d_{\text{МК}})$ имеют вид [7, 72].

$$f(d_{\text{МК}}) = \beta \lambda d^{\beta-1} e^{-\lambda d_{\text{МК}}^{\beta}}; \quad (2.1)$$

$$F(d_{\text{МК}}) = 1 - e^{-\lambda d_{\text{МК}}^{\beta}}; \lambda > 0, \beta > 0, d_{\text{МК}} > 0$$

При $\beta = 1$, распределении Вейбулла обращается в экспоненциальное, при $\beta = 2$, это распределение называют распределение Релея, при $\beta \rightarrow \infty$, распределение стремится к нормальному. Усредненной характеристикой распределения вероятностей непрерывной случайной величины x является математическое ожидание [73].

$$M(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx \quad (2.2)$$

Применительно к молотому кофе, x является диаметром частиц $d_{\text{МК}}$ и изменяется от 0 до ∞ мм. При этом $M(d_{\text{МК}})$ равно эквивалентному диаметру $d_{\text{э}}$. Для распределения Вейбулла математическое ожидание, характеризующее средневзвешенный эквивалентный диаметр, определяют уравнением (2.4) [74].

$$d_{\text{э}} = M(d_{\text{МК}}) = \lambda^{-\frac{1}{\beta}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right); \lambda > 0, \beta > 0, \quad (2.3)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция;

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} V^{x-1} e^{-V} dV \text{ (интеграл Эйлера); } x > 0$$

Аналитической зависимости соответствует дискретная формула.

$$d_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N g_i d_{\text{мк.}i}, \text{ мм}; \quad \sum g_i = 1, \quad (2.4)$$

$d_{\text{мк.}i}$ – диаметр i – той фракции частиц молотого кофе, мм;

g_i – содержание частиц i – той фракции молотого кофе, д.ед.;

N – количество фракций.

Более применимым показателем для оценки распределения фракций различных диаметров относительно d_{Σ} является коэффициент вариации.

$$V = \sqrt{\frac{\sigma_d^2}{d_{\Sigma}^2}}, \text{ мм/мм} \quad (2.5)$$

Чем больше значение V , тем относительно больший разброс и меньшая выравненность исследуемых значений диаметров частиц молотого кофе.

Определение характерного размера частиц молотого кофе (неправильной формы) затруднительно. Поэтому введено понятие эквивалентного диаметра, соответствующего: диаметру круга, площадь которого эквивалентна проекции частиц (например, при измерениях под микроскопом): диаметру шара равного объема (например, определенного как граничный размер при рассеве); диаметру, рассчитанному по предельной скорости движения частицы молотого кофе в различных силовых полях.

В соответствии со статистическими данными число измеряемых частиц молотого кофе должно составлять, по крайней мере, 300—500. Представительность пробы можно повысить, если увеличить число частиц примерно до 3000. Измерение под микроскопом частиц дает надежные и точные значения. Основным размером частицы молотого кофе неправильной формы принято считать эквивалентный диаметр.

$$d_{\Sigma} = \frac{6}{S_Y} \quad (2.6)$$

Где, S_Y – удельная поверхность частицы молотого кофе (отношение ее поверхности к объему). Значение S_Y обычно определяют с помощью специального прибора для порции молотого кофе.

d_3 - это обычно средний диаметр частиц исследуемой порции молотого кофе. Чаще всего в качестве среднего диаметра частиц порции молотого кофе используют среднемассовый диаметр.

$$d_{\text{мк}} = \frac{\sum_{i=0}^n d_{3i} m_i}{\sum_{i=0}^n m_i}, \text{ где,} \quad (2.7)$$

$n = 5-12$ - число фракций (классов), на которые рассеивается порция молотого кофе,

$d_{3i} m_i$ – эквивалентный диаметр и масса частиц i -й фракции.

Выбираем микрофотографии, где можно смотреть границы гранулы молотого кофе достаточно ясно. Затем, надо найти микрофотографию по масштабу модели микроскопа, с тем же увеличении микроскопа измеряется размер частиц. Допустим, измеряем размер частица кофе в микрографии по 50х, т.е, масштаб – 50х. Очевидно, что в интервале от 0 до 10см линейки есть 35 деление шкалы. Каждые из этих делений равняется 0,1мм. Таким образом, калибруем линейку, создаем переменные со своими значениями и получаем уравнения.

$$n_R U_R = n_p U_p \quad (2.8)$$

Откуда $U_R = \frac{U_p}{n_R} n_p$, $U_R = k$ – постоянная калибрация и его абсолютная ошибка будет:

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta n_p}{n_p} + \frac{\Delta n_R}{n_R} + \frac{\Delta U_p}{U_p}, \quad (2.9)$$

Ширина шкалы $\frac{1}{2}$ делений $\Delta n_p = 0,5$ и тогда получим.

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{0,5}{n_p}$$

$$k = \frac{35}{100} 0.01 \text{ мм} = 0,0035 \text{ мм},$$

$$\Delta k = \frac{0,5}{35} 0.0035 \text{ мм} = 5 * 10^{-3} \text{ мм, т.е } k = (3.50 \pm 0.05) \frac{\mu\text{м}}{\text{мм}}$$

Любая структура (зерно, частиц и т.д.), имеющие длину L (миллиметров) в микрофотографии, его правильный размер будет $L*k$ микронов. На

выбранной микрофотографии построятся (N) равные отрезки, все с одинаковой длиной (L), в десяти разных местах. Допустим, длина 15см, на каждой отрезке, считаем число (n) пересечений между частицами. Если один конец отрезка находится в пределах зерна, учитывается как половина пересечения. На рисунке 2.5., можно представить границы МК полученные от микрофотографии с помощью СЗМ в результате чего, была получена средний диаметр частиц обжаренного МК (таблица 2.1).

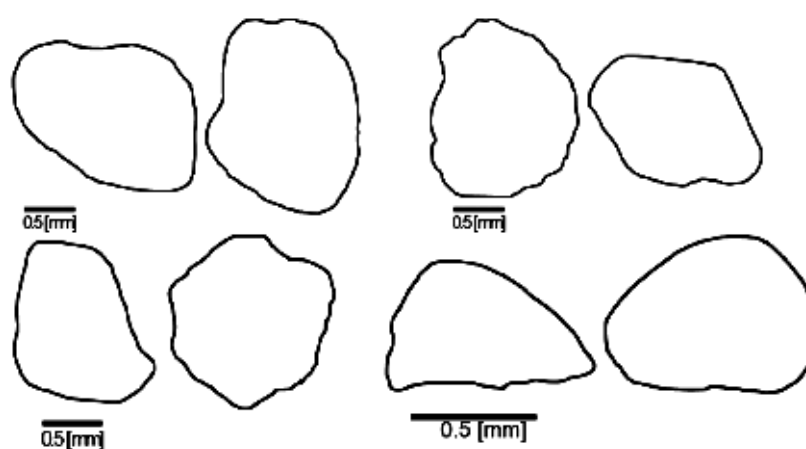


Рисунок 2.5. Границы и диаметр частиц МК

Таблица 2.1.

Средний диаметр частиц обжаренного молотого кофе											
№	$d_{МК}$	№	$d_{МК}$	№	$d_{МК}$	№	$d_{МК}$	№	$d_{МК}$	№	$d_{МК}$
1	0,399	6	0,400	11	0,477	16	0,464	21	0,462	26	0,475
2	0,233	7	0,337	12	0,591	17	0,637	22	0,658	27	0,393
3	0,253	8	0,535	13	0,405	18	0,650	23	0,623	28	0,384
4	0,356	9	0,329	14	0,484	19	0,354	24	0,351	29	0,517
5	0,178	10	1,088	15	0,574	20	0,489	25	0,499	30	0,765

На основании проведенных исследования и расчетов размер частиц МК получены результаты диаметр частиц всех видов помола молотого обжаренного кофе в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Помол МК	Диаметр частиц $d_{\text{МК}}$ [мм]
Очень тонкий	Менее 0,43
Тонкий	Больше либо равно 0,43 и менее 0,72
Средний	Больше либо равно 0,72 и менее 1,70
Большой	Больше либо равно 1,70

2.1.2. Определение насыпной плотности молотого кофе

Оценка закона и параметров распределения насыпной плотности молотого кофе в бункере объемного дозатора при производстве кофе средней степени молотого кофе сорта «Арабика» в рыхлонасыпном состоянии проводилась с использованием статистических методов. Для определения массы дозы использовались лабораторные весы VIBRA серии AJ 1200 от японской компании Shinko Denshi с ценой деления 0,01 г.

Насыпная плотность молотого кофе зависит от плотности частиц; величины частиц и соотношения различных фракций; влажности частиц; степени давления вышележащих слоев на нижние. Стабилизация содержания влаги в кофе в процессе эксперимента проводилась использованием кофе для экспериментов сразу после вскрытия вакуумной упаковки. Степень давления верхних слоев минимизируется за счет рассмотрения малого объема дозировочного стакана (5- 10 см³).

Изобретение направлено на повышение точности, достоверности, сходимости и воспроизводимости результатов измерения натуре и насыпной плотности молотого кофе [151].

Предварительный анализ показал возможность аппроксимации эмпирической кривой распределения насыпной плотности экстремальным распределением. Наличие длинных «хвостов» кривой плотности распределения можно объяснить наличием мелких фракций в составе дисперсного молотого

кофе. При таком подходе параметры, требующие конкретизации – тип распределения, параметр положения, параметр масштаба:

При аппроксимации эмпирических кривых теоретическими законами распределения на основе анализа данных эксперимента для экстремального распределения I-го типа параметр положения равен 1, а параметр масштаба не превышает 3. Положения центров распределения молотого кофе (mol1) а также сублимированного кофе (subl1) показывается на рисунке 2.6 [117, 118, 169].

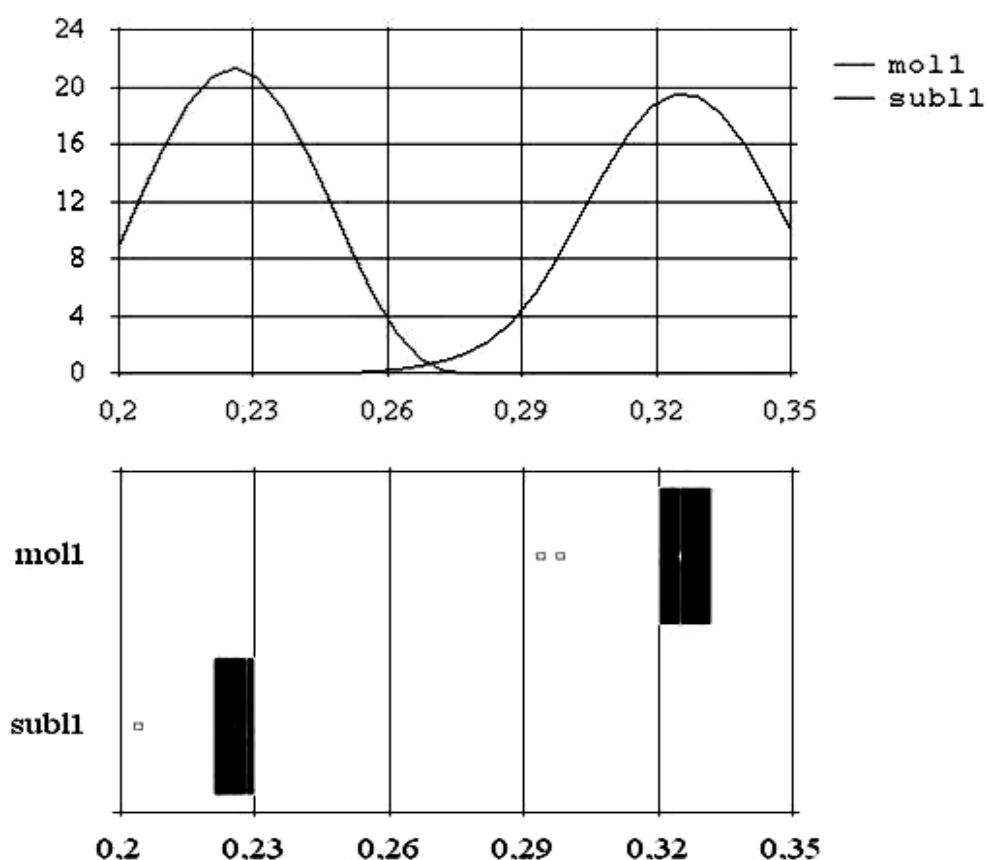


Рисунок 2.6. Положения центров распределения МК

Результаты эксперимента показал, что плотность молотого кофе калибруется от 300 до 600 кг/м³.

2.1.3. Экспериментальное определение сыпучести МК

Сыпучесть молотого кофе определяется по результатам испытаний на специальном приборе – трибометре в лабораториях и характеризуется

зависимостью предельных касательных напряжений σ_y от нормального напряжения σ_x в толще МК [107, 132].

Касательное и нормальное напряжения вычисляются по следующим формулам.

$$\sigma_x = \frac{S_M}{F_c}; \sigma_y = \frac{T_c}{F_c}; \quad (2.10)$$

$$S_M = P_\Gamma + m_{МК} \quad (2.11)$$

где S_M – суммарный вес прижимного груза P_Γ и масса молотого кофе $m_{МК}$ в подвижной рамке; $F_c = 0,0036 \text{ м}^2$ – площадь сдвига в лабораторном трибометре; T_c – сила сдвига.

Начальное сопротивление сдвигу τ_0 растет при повышении влажности мелкофракционных частиц МК; при верхнем пределе влажности начальное сопротивление влажной МК во много раз больше, чем начальное сопротивление в сухом состоянии МК. При содержании пылевидных и порошкообразных фракций, то увлажнение вызывает существенного повышения связности. Как указано в п.1.3, высота падения мелкофракционные частицы МК влияет на углу естественного откоса.

Результаты экспериментального определения сыпучести МК представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3.

№ п/п	Вес груза, P_Γ , кг	Сумма рный вес S_M , кг	Сила сдвига, T_c , кг	Напряжения, кг/м ²		Характеристики сыпучести МК			
				σ_x	σ_y	τ_0 , кг/м ²	β_w , град	f'_w	α , град
1	0,085	0,185	0,155	51,10	43,05	10,244	31,4	0,62	36,0
2	0,085	0,185	0,155	51,10	43,05				
3	0,208	0,308	0,245	85,08	60,05				
4	0,208	0,308	0,245	85,08	60,05				
5	0,485	0,585	0,395	161,5	109,72				

Практика показывает, что мелкофракционные частицы МК имеют угол естественного откоса больше, чем угол внутреннего трения.

На основе полученной таблицы, построена график зависимости предельных касательных напряжений σ_y от нормальных напряжений σ_x в толще МК на рисунке 2.7. Видно что, с повышением нормального напряжения σ_x наблюдается увеличение касательного напряжения σ_y .

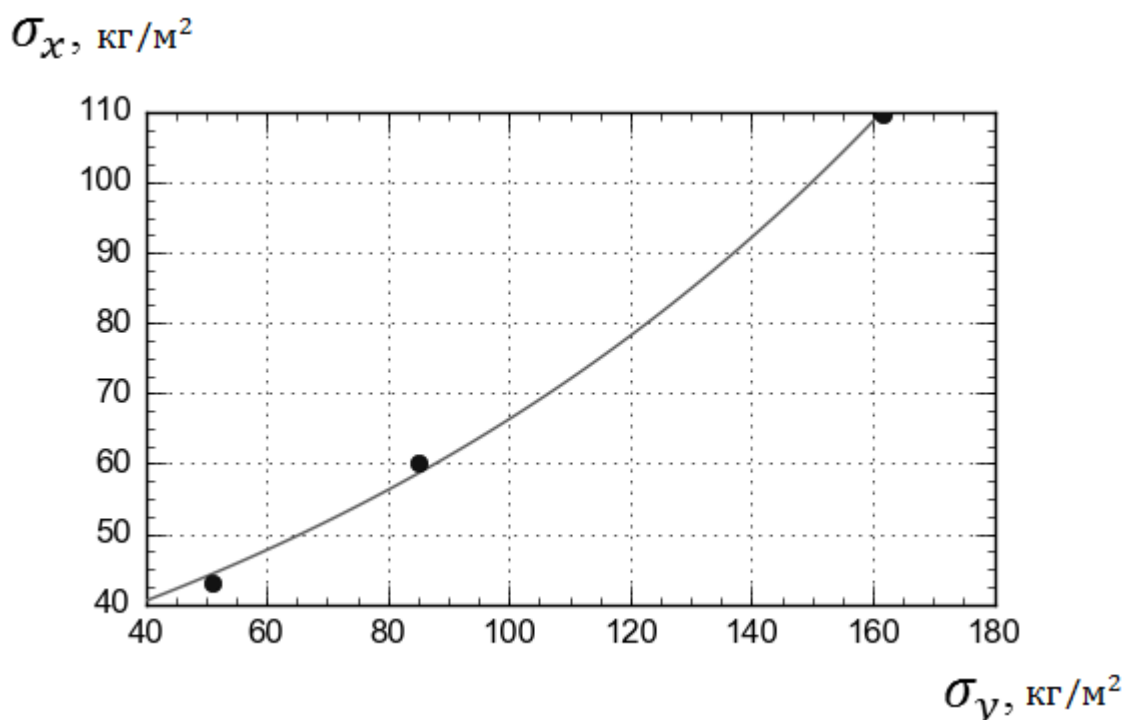


Рисунок 2.7. Зависимости предельных касательных напряжений σ_y от нормальных напряжений σ_x в толще МК

Зависимость коэффициента внутреннего трения от насыпной плотности МК – на рисунках 2.8. - 2.9.

Насыпная плотность МК практически не влияет на численные значения коэффициентов внешнего трения.

При увеличении нормального напряжения в зоне сдвига на 15 % увеличивается коэффициент внутреннего трения не более, чем на 2–3 %.

Результаты исследования сыпучести МК, полученные на трибометре, показывали, что мелкофракционные частиц МК являются связным материалом, так как сопротивление сдвигу τ_0 больше нуля.

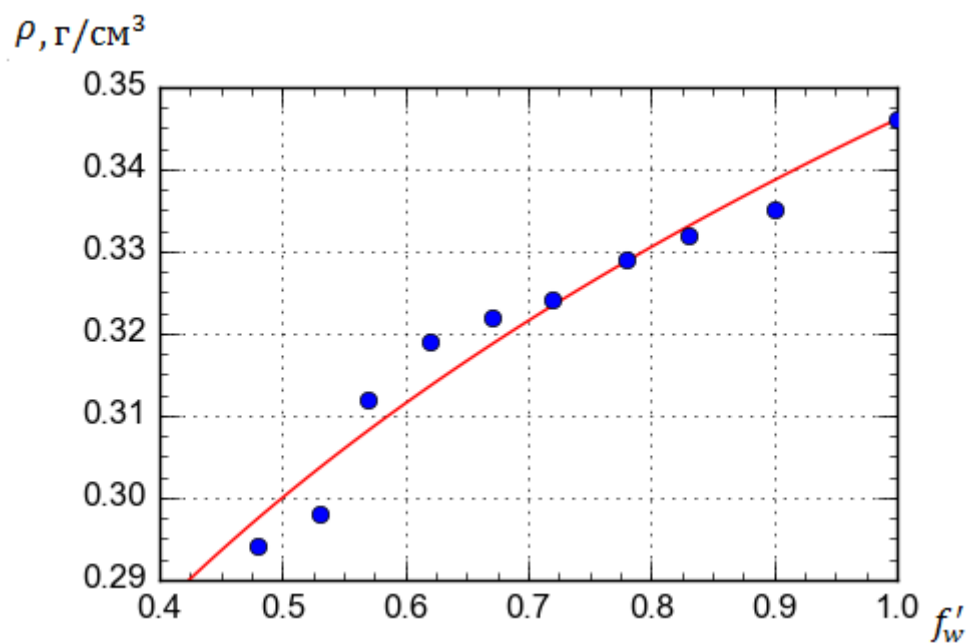


Рисунок 2.8. Характерные зависимость плотности МК от коэффициента внутреннего трения

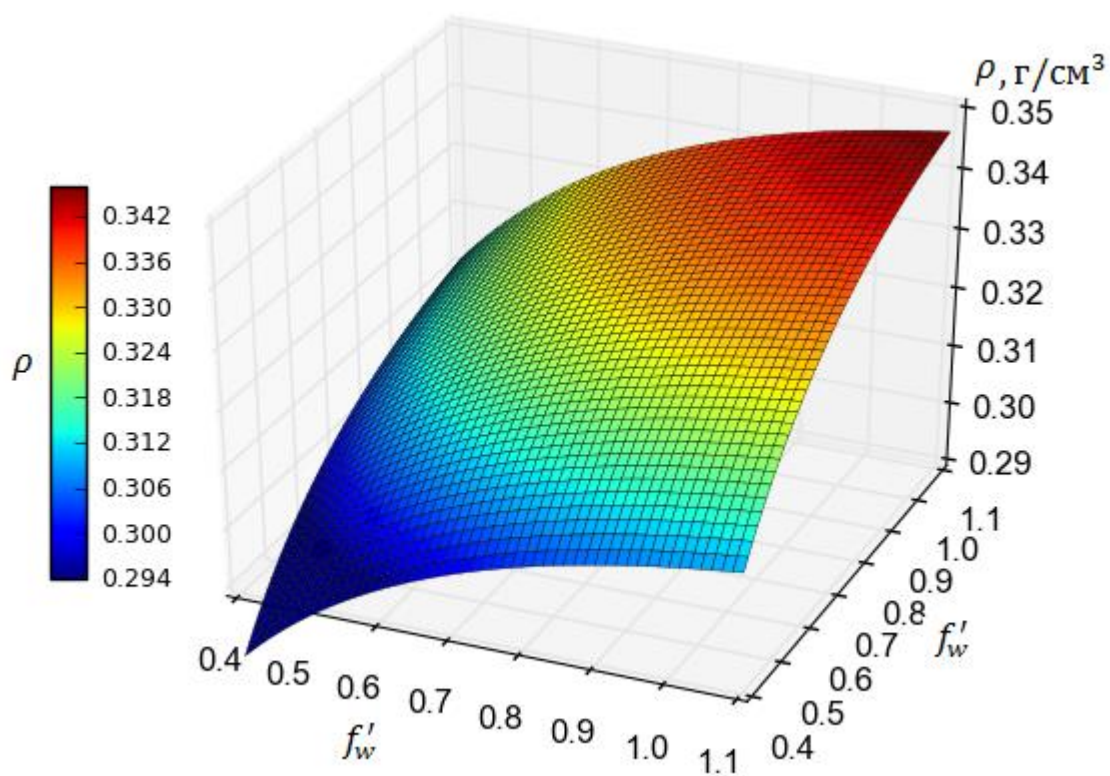


Рисунок 2.9. График поверхности изменения плотности от коэффициента трения МК

Полученные экспериментальные значения характеристик молотого кофе могут быть использованы в дальнейшем при математическом и натурном моделировании процессов дозирования, а также для расчета технических параметров стаканчикового дозатора.

2.2. Анализ аналитических подходов к моделированию процесса истечения молотого кофе из бункера дозатора

В результате анализа проведенных в 1 главе исследований, были отобраны наиболее информативные параметры состояния технологического процесса производства МК на стадии дозирования с использованием стаканчикового дозатора СД. Учитывая проведенные исследования (п. 1.3) и (п. 1.9) была спроектирована параметрическая модель процесса истечения МК на рисунке 2.10.

Процесс истечения молотого кофе зависит от фракционного состава, формы частиц, их взаимодействия об ограничивающую поверхность бункера объемного дозатора СД [123, 63]. Взаимодействие частиц молотого кофе в основном, определяется способностью их перемещения и устойчивого истечения. Поэтому необходимо рассмотреть механизм их взаимодействия. Параметры переменные при процессе истечения молотого кофе (МК) усложняют на много вычисление, чтобы найти адекватную модель, к которой они относятся [88, 43-44].

При истечении МК может не вытекать из отверстий бункера объемного дозатора СД, если происходит в том случае, когда над отверстием образуется свод из частиц молотого кофе. Сводообразование молотого кофе объясняется возникновением в зоне разгрузочного отверстия такого напряженного состояния, при котором горизонтальные напряжения в слое частиц МК достигают наивысшего значения. Горизонтальные давления уплотняют МК, создают соответствующую вертикальную составляющую распора свода,

которая становится достаточной для восприятия массы молотого кофе над отверстием бункера СД [28, 35].

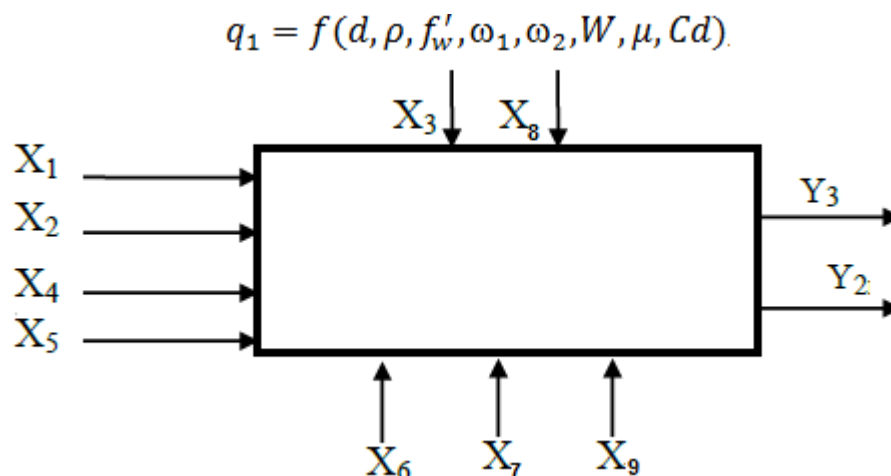


Рисунок 2.10. Параметрическая модель процесса истечения МК

μ – гранулометрический состав (размер частиц) (0.02-0.04мм) (X1)

q_1 – расход подачи МК ($\text{м}^3/\text{с}$) (X2)

Cd – коэффициент истечения (0.1- 0.6) (X3)

W – влажность МК (4-6%) (X4)

d – размер выпускного отверстия бункера (0.08- 0.11м) (X5)

ω_1 – скорость подачи молотого кофе в бункер (рад/сек) (X6)

v_{uc} – скорость истечения МК (0.03 – 0.4 м/с) (X7)

ρ – плотность МК (300 – 600 $\text{кг}/\text{м}^3$) (X8)

f'_w – коэффициент трения (0.5 – 0.7) (X9)

q_2 – расход молотого кофе на выходе бункера, (м^3) (Y2)

h – уровень молотого кофе в бункере (0.2 – 1м) (Y3).

Размер диаметра выпускного отверстия бункера d , влажность W и плотность МК ρ , а также коэффициент истечения Cd и коэффициент трения f'_w являются основными свойствами при истечении молотого кофе из бункера стаканчикового дозатора в процессе дозирования [65, 131].

Для молотого кофе существует минимальный диаметр отверстия ($d_{\text{мин}}$), при котором над ним образуется устойчивый свод из частиц молотого кофе,

препятствующий их истечению из отверстия на рисунке 2.11. Также высокая влажность молотого кофе приводит к образованию сводов.

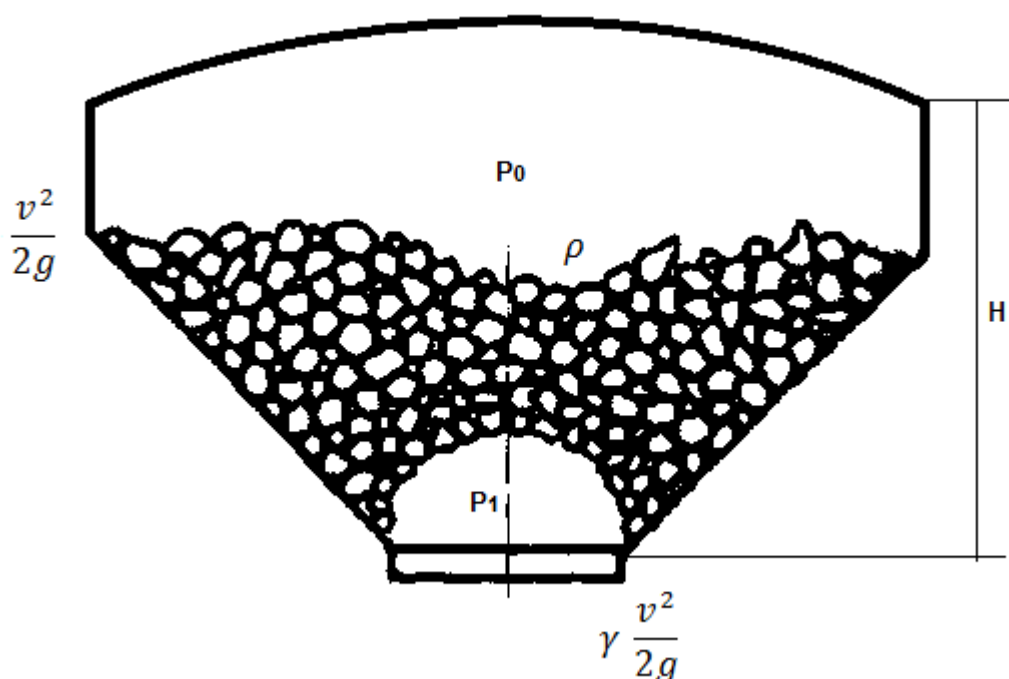


Рисунок 2.11. Свод молотого кофе над отверстием бункера

Чтобы определить, коэффициент истечения рассматриваем гидравлический подход к истечению МК, описывающий через уравнения механики, где теоретическая скорость истечения МК, определяется по теореме Бернулли [149, 153, 158, 160, 161].

$$H + \frac{P_0}{\rho} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{v^2}{2g} + \gamma \frac{v^2}{2g} \quad (2.12)$$

Где, H – высота бункера, ρ – плотность молотого кофе, $\frac{P_0}{\rho}, \frac{P_1}{\rho}$ – нагрузки давлением, $\frac{v^2}{2g}$ – нагрузки скорости, $\gamma \frac{v^2}{2g}$ – нагрузки коэффициента сопротивления отверстия истечения бункера, γ – коэффициент сопротивления.

Для решения задачи определяется начальное условие: Скорость в точке $P_0 = 0$, абсолютное давление P , будет равно.

$$P = H + \frac{P_0 - P_1}{\rho} \quad (2.13)$$

Так как рассматриваем атмосферическое давление в точке P_1 , то $P_1 = P_0 = P_{\text{атм.}}$, тогда $P = H$. Сравниваем уравнение (2.12), (2.13) и получаем:

$$P = \frac{v^2}{2g} (1 + \gamma) \quad (2.14)$$

Из уравнения (2.14) определяем скорость истечения молотого кофе:

$$v = \frac{1}{\sqrt{1+\gamma}} \sqrt{2gH} = C \sqrt{2gH}, \text{ где } C - \text{коэффициент скорости [89].}$$

Согласно уравнению Зенкова, у молотого кофе при истечении из бункера как сыпучий материал имеет коэффициент истечения. Этот коэффициент истечения определяется по следующим формулам [64].

$$Cd = \varepsilon C, \text{ где} \quad (2.15)$$

ε – коэффициент, зависящий от размера частицы молотого кофе (μ) и размера отверстия истечения бункера (d) [143].

$\varepsilon = \left(\frac{d_{\text{МК}}}{d}\right)^2$, где $d_{\text{МК}}$ – диаметр частиц молотого кофе; d – диаметр отверстия истечения бункера. Тогда гидравлическая скорость истечения молотого кофе из бункера СД будет.

$$v_{\text{гд}} = Cd\sqrt{2gH} \quad (2.16)$$

Формула (2.16) совпадает с формулой Зенкова [142].

Практика показало, что гидравлический вид истечения всех частиц молотого кофе находятся в движении, и осуществляется редко. Свободная поверхность кофе в бункере не имеет четко выраженной воронки, все частицы данной поверхности молотого кофе опускаются одновременно и скорость некоторых частиц носит стохастический характер. При таком виде истечения отсутствуют застойные зоны, что позволяет выравнивать поток МК, который поступает в бункер [182].

При нормальном виде истечения молотого кофе вдоль стенок бункера СД образует застойную зону. В этой зоне частицы неподвижны до тех пор, пока

воронка образованная на поверхности молотого кофе, не достигнет самого нижнего поперечного сечения бункера.

МК отличается от жидкостей наличием внутреннего трения, а также имеются силы сцепления. При процессе хранения МК в бункере СД, осуществляются напряжения на стене бункера.

Для определения оптимальных параметров бункеров для хорошего истечения молотого кофе, рассматривается теория Janssen и Walker [57, 178].

Аналитический подход к определению давления действующего в бункере СД при процессе хранения МК принимается, согласно результатам исследования тензоров напряжений сыпучих материалов основанный Janssen в 1895. Он с помощью цилиндра находил разные тензоры напряжения, которые действуют на сыпучий материал при его нахождении в бункере.

$$\sigma_{\text{нап}} = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}; 0 < \sigma < 1; \sigma_c = \frac{f_v}{f_h};$$

где, $\sigma_{\text{нап}}$ — отношение между тангенциальных (касательных) и нормальных напряжения; σ_y — тензор в оси Y (тангенциальное или касательное напряжение); σ_x — тензор в оси X (нормальное напряжение); σ_c — напряжение в условиях критического состояния молотого кофе; f_h — тензор в оси X частиц молотого кофе; f_v — тензор в оси Y частиц молотого кофе.

В 1970 Hancock анализировал теорию Janssen и представил метод (Method of differential slices), который стал основанием конструкции бункеров для сыпучих материалов. В 1966 Walker исправил теорию Janssen по поводу основных тензоров напряжения через теорию Mohr, но является необходимым только когда есть ошибка [177]. Согласно теориям Jenike известно как “ wald yield locus ” (WYL), можно определить адгезию частиц молотого кофе в бункере и коэффициент трения [163-166]. Для равновесия молотого кофе, касательное напряжение по любой площадке, должно быть меньше или равно сопротивлению сдвигу МК.

Напряжения действующие, в процессе истечения молотого кофе из бункера СД описываются.

$$\sigma_y = c_w + \sigma_x \tan \beta_w = c_w \sigma_x f'_w \quad (2.17)$$

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

Давление в цилиндрической части бункера СД с молотым кофе на рисунке 2.12б будет:

$$P = \rho g(H - h) \quad (2.18)$$

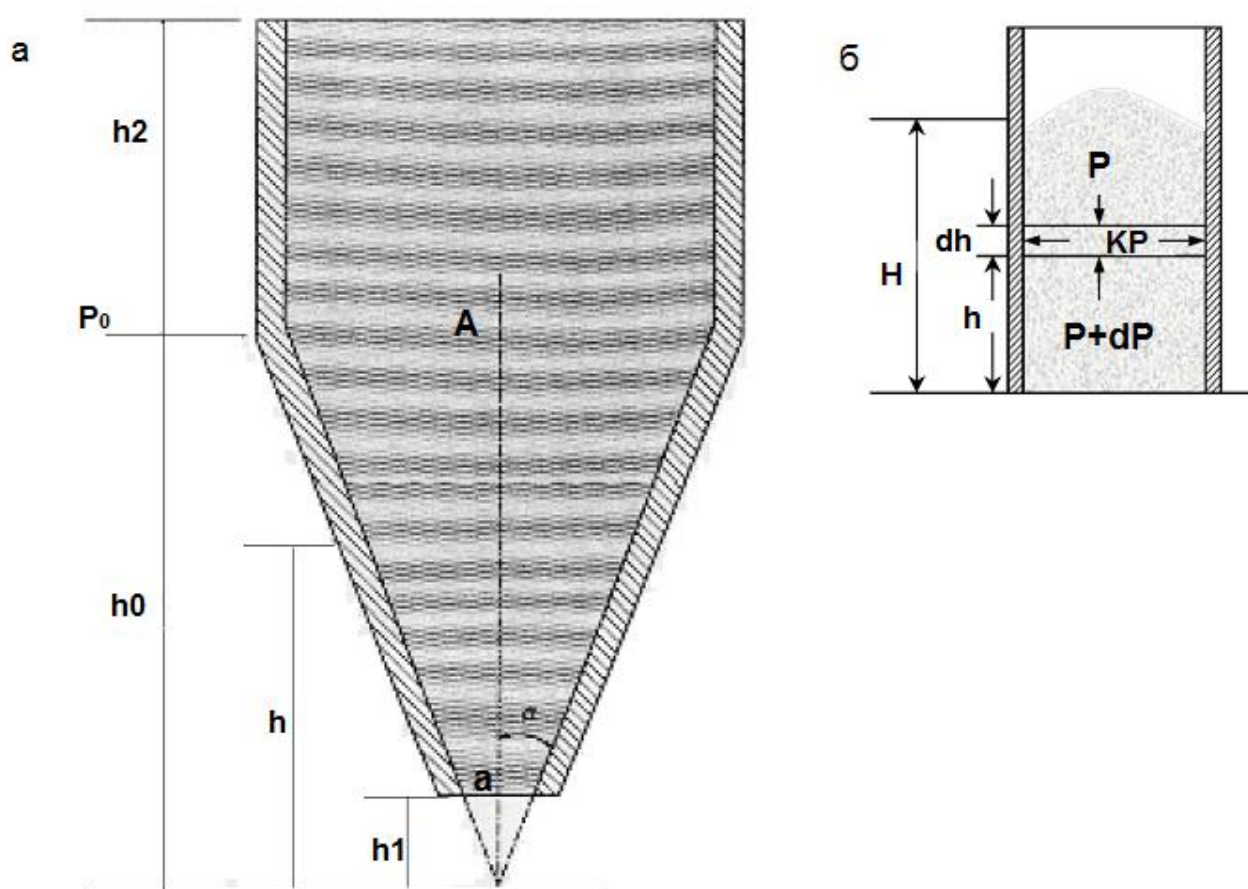


Рисунок 2.12. Параметры, определяющие давления в бункере при процессе хранения МК, а. в конической части б. в цилиндрической части

Давление постоянно в определенной секции цилиндра бункера СД с определенной высотой уровня МК. Давление на базе части цилиндра бункера СД обозначается P_0 , на рисунке 2.3а; h_2, h_1, h_0, h – величины уровня МК в

бункере. Давления в цилиндрической части бункера определяется через уравнение коэффициентов и параметров действующих, на дифференциальный элемент частиц МК при хранении в бункере СД из (см. рисунка 2.12а).

$$A\rho gh dh + (P + dP)A - PA - (C_w + f'_w KP)C dh = 0,$$

$$A\rho gh dh + (P + dP)A = (C_w + f'_w KP)C dh + PA, \text{ где,} \quad (2.19)$$

$A\rho gh dh$ – коэффициенты, определяющие вес частиц молотого кофе;

$(P + dP)A$ – давление направления вниз;

$(C_w + f'_w KP)C dh$ – коэффициенты, определяющие трение, которое держат частицы МК;

PA – давление направления вниз;

ρ – плотность молотого кофе;

A – площадь цилиндра бункера СД;

C – коэффициент периметра (мокрой поверхности от МК) в конусе бункера;

K – коэффициент подвижности (текучести) МК;

C_w – коэффициент адгезий молотого кофе на стену;

f'_w – коэффициент внутреннего трения молотого кофе по стенкам бункера.

Перегруппируем слагаемые из уравнения (2.19) и получаем следующее уравнение:

$$\frac{dP}{dh} = \rho g - \frac{CC_w}{A} - \frac{f'_w KPC}{A} \quad (2.20)$$

$$\int \frac{dP}{dh} = \int \left(\rho g - \frac{CC_w}{A} - \frac{f'_w KPC}{A} \right),$$

после интеграции уравнения (2.20) получаем:

$$P = P_H \exp \left[\frac{f'_w CK(h - H)}{A} \right] + \frac{\left(\frac{A\rho g}{C} \right) - C_w}{f'_w K} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{f'_w CK(h - H)}{A} \right] \right\}, \quad (2.21)$$

где; P_H – это давление на высоте H цилиндрической части бункера СД, при условии ($C_w = 0$). Давление на базе цилиндра бункера будет уравнение (2.22) предложено Janssen:

$$P_0 = \frac{\rho g D}{4f'_w K} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{4f'_w K (-H)}{D} \right] \right\} \quad (2.22)$$

где; D – диаметр цилиндра бункера СД

Максимальное давление, которое можно получить в бункере, вычитается при условии $H \rightarrow \infty$, тогда:

$$P_{0, \text{макс}} = \frac{\rho_b g D}{4f'_w K} \quad (2.23)$$

В результате вес молотого кофе уменьшается из-за трения при скольжении на стенки бункера СД. Максимальное давление, оно пропорционально диаметром D , а обратно пропорционально коэффициентом внутреннего трения f'_w . Коэффициент K , определяется по формуле (2.24) теорий Walker [181].

$$K = \frac{1 - \sin \delta}{1 + \sin \delta} \quad (2.24)$$

δ – эффективный угол трения. По предыдущим рисункам 2.12а, определяем давление, действующее в конической части бункера СД. Давление для конической части бункера описывается:

$$\left. \begin{aligned} P &= \left(\frac{h}{h_0} \right)^p P_0 + \frac{h \rho g}{p-1} \left[1 - \left(\frac{h}{h_0} \right)^{p-1} \right]; \quad p \neq 1 \\ P &= \left(\frac{h}{h_0} \right) P_0 + h \rho g \ln \left[\frac{h}{h_0} \right]; \quad p = 1 \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

Где h_0 – это высота действующее давление P_0 (давление в конусе бункера) и p – коэффициент формы бункера (конус). Коэффициент формы бункера определяется:

$$p = \frac{2B'D^*}{\tan \emptyset}, \quad (2.26)$$

где, $\emptyset$ – половина углы стены конуса бункера, D^* – коэффициент функция распределения ($D^* = 1$), а B' , определяется по формуле (2.27).

$$B' = \frac{\sin \delta \sin(2\emptyset + K_0)}{1 - \sin \beta_w \cos(2\emptyset + K_0)} \quad (2.27)$$

$$K_0 = \beta_w + \arcsen \left(\frac{\sin \beta_w}{\sin \delta} \right); \arcsin > \frac{\pi}{2} \quad (2.28)$$

Таким образом, полученные уравнения достаточно точно позволяют определить расчетные коэффициенты давления, действующие в конической и цилиндрической частях бункера СД.

Результаты экспериментальных исследования формы частиц и сыпучести МК (п. 2.1-2.3) подтверждает, что поведение в процессе истечения МК отличается от жидкости. Результаты анализа определения, коэффициентов напряжения частиц МК калибруется в интервале (0.3 – 0.6 Па). Гидравлическая скорость истечения МК предложена Л. Зенковой (2.16) составляет 1.33 (м/с) и не учитываются параметры сыпучести МК, поэтому необходимо найти адекватную формулу для определения скорость истечения МК.

2.3. Скорость свободного истечения МК

Скорость истечения молотого кофе определяется из уравнения (2.29) полученного из анализа (см. рисунок 2.11, п.2.2). Коэффициенты, которые зависят от канала расхода бункера СД и сыпучести молотого кофе.

$$\frac{v^2}{2gH(\tan \beta_w)} - pd + \frac{\tau_0}{\rho} = \partial \quad (2.29)$$

Где, $\frac{v^2}{2gH(\tan \beta_w)} - pd$ – коэффициенты зависимости от канала расхода бункера, ∂ – ускорение зависимости от повышения скорости истечения МК, $\frac{\tau_0}{\rho}$ – коэффициенты зависимости от сыпучести МК, H – высота бункера.

При увеличении скорости истечения молотого кофе, то $\partial \rightarrow 0$. Скорость истечения будет равна.

$$v_{\text{и}} = Cd \sqrt{2gh(\tan \beta_w) \left[pd - \frac{\tau_0}{\rho} \right]}, [\text{м/с}] \quad (2.30)$$

Где, $v_{\text{и}}$ – скорость истечения МК, Cd – коэффициент истечения (для МК = 0.3), g – ускорение силы тяжести, τ_0 – сопротивление сдвигу, ρ – плотность МК, p – коэффициент зависимости от формы бункера СД ($p = 1$ для конической части бункера), d – диаметр отверстия канала истечения; β_w – угол наклона бункера СД, h – уровень МК в бункере.

Полученная формула (2.30) скорости истечения $v_{\text{и}}$ позволяет, строить графики зависимости скорости истечения МК от конструктивных параметров бункера СД на рисунке 2.13. Практика показала, что адекватные параметры для хорошего истечения МК из бункера СД составляют бункер с размером выпускного отверстия $d = 0.10$ м и угол наклона $\beta_w = 31.4^\circ$ на рисунке 2.14.

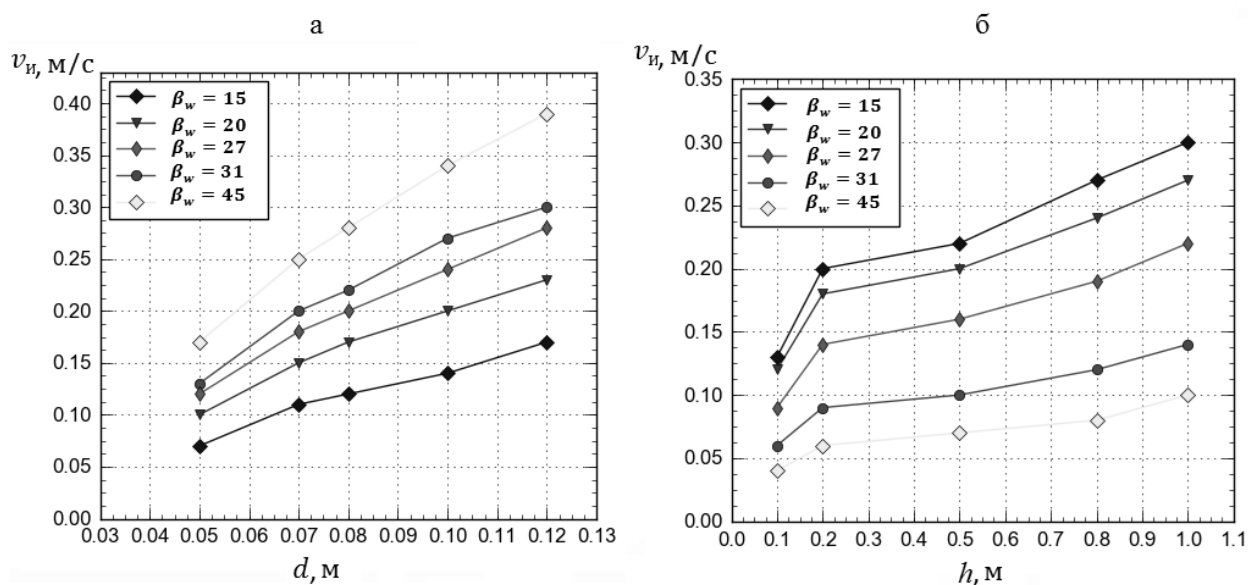


Рисунок 2.13. Характерные зависимости скорости истечения МК, учитывая угла наклона бункера β_w а. от диаметра отверстия бункера СД, б. от уровня МК в бункере СД

Определение скорость истечения, время истечения и кругового поля напряжений в сыпучей среде МК позволяет выявить параметры бункера, обеспечивающего стабильность истечения молотого кофе без сводообразования и правильно настроить объемный дозатор СД для эффективности оценки качества продукта [155].

Результаты анализа исследования и проведенные расчеты по формуле (2.30) показывают, что скорость истечения МК из бункера СД калибруется между (0.1 – 0.4 м/с).

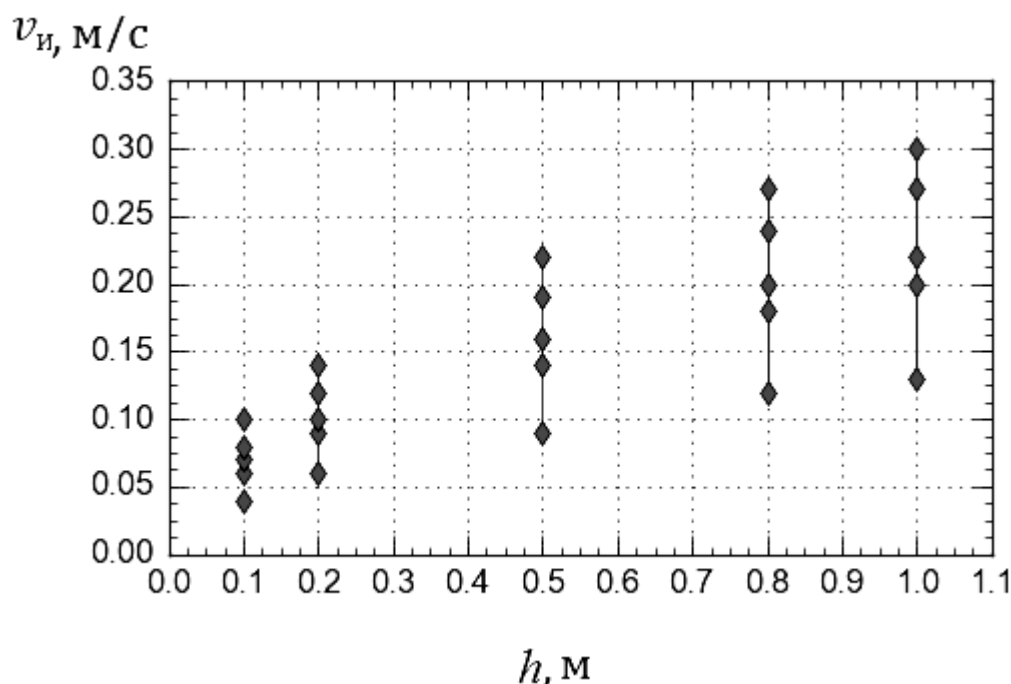


Рисунок 2.14. Скорость истечения МК при изменении уровня и угла наклона $\beta_w = 31.4^\circ$

2.4. Параметры конструкция бункера стаканчикового дозатора (БСД)

Чтобы обеспечить устойчивое течение молотого кофе из бункера СД, необходимо правильно определить его геометрические размеры и параметры конструкция: форму, угол наклона стенок β_w , минимально допустимый размер выпускного отверстия бункера $d_{\min}$.

Одним из показателей, характеризующим конструкцию бункера СД (круглый, квадратный, щелевой, сложный и т. д.), предназначенного для объемного дозирования неправильных форм частиц МК является критический (минимально допустимый) размер выпускного отверстия $d_{\min}$ бункера СД.

На рисунке 2.15а, нормальное напряжение σ_x , больше чем критический тензор напряжения МК σ_c , поэтому при истечении МК из такого конструкции

бункера, не образуется своды. Но если диаметр отверстия истечения бункера уменьшить при условии того что напряжение свободного истечения в условиях критического состояния молотого кофе σ_c будет больше чем нормальное напряжение с постоянным углом наклона бункера СД, то образуется своды (рисунок 2.15б). Точка пересечения между критическим напряжением σ_c и нормальным напряжением σ_x является минимальным диаметром отверстия истечения бункера СД для молотого кофе.

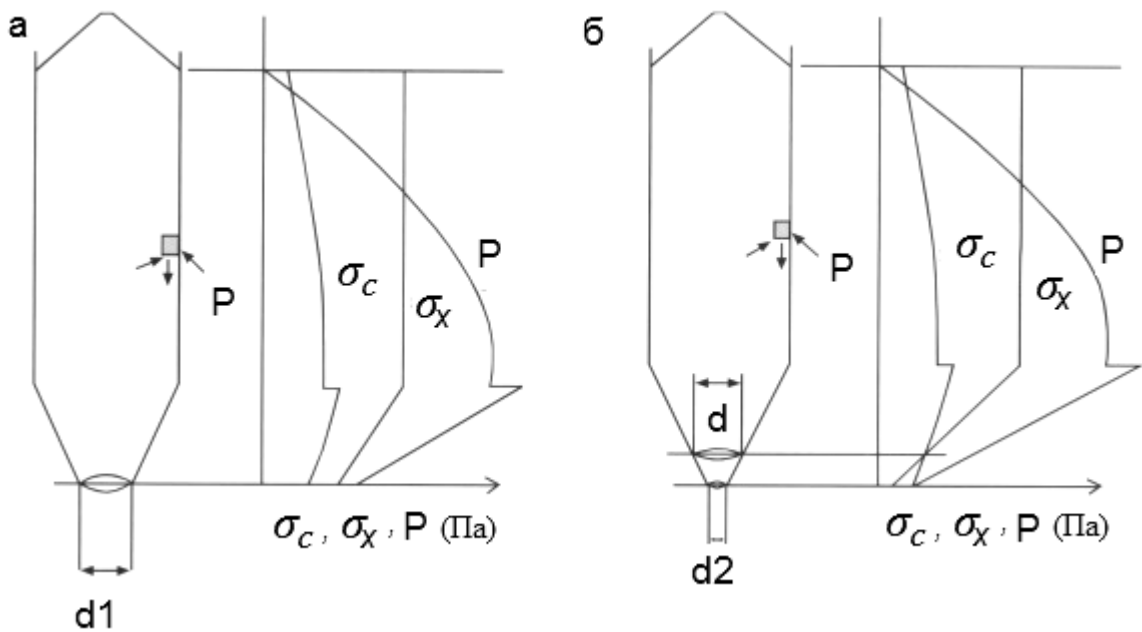


Рисунок 2.15. Параметры бункера СД а. при появлении сводообразования, б. без сводообразования.

Критический размер отверстия для молотого кофе определяется по формуле [130]:

$$d_{\text{мин}} = p \frac{\sigma_c}{\rho g}, \quad (2.31)$$

где, $d_{\text{мин}}$ – критический размер выпускного отверстия бункера СД для молотого кофе, м; p – коэффициент зависимости от формы бункера СД; σ_c – напряжение свободного истечения в условиях критического состояния молотого кофе, Па; ρ – плотность молотого кофе, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с.

Результаты анализа параметров напряжения, сил равновесия, давления и скорость истечения МК в бункере СД позволяет определить адекватные параметры конструкция бункера, чтобы расход МК был массовый и без сводов. Практика показала, что минимальный угол наклона стенок бункера $\beta_{w(\text{мин})}$ составляет 27° для среднего помола МК с минимальным диаметром $d_{\text{мин}} = 4 * 10^2, \text{мм}^2$ и время истечения $t = 20\text{с}$, а для тонкого помола 50° с минимальным диаметром $d_{\text{мин}} = 2 * 10^2, \text{мм}^2$ и время истечения $t = 40\text{с}$.

2.5. Моделирование с использованием метода дискретных элементов МДЭ

Моделирование МДЭ (Метод дискретных элементов) для расчёта движения большого количества частиц МК позволяет моделировать, оптимизировать и обработать движения всех частиц отдельно как сплошная среда в системах непрерывного дозирования [150]. Один из первых инструментов для инженерного моделирования с возможностью МДЭ, является STAR-CCM+. Наиболее известны следующие программы, реализующие метод дискретных элементов: Chute Maven (Hustrulid Technologies Inc.), PFC2D и PFC3D, EDEM (DEM Solutions Ltd.), GROMOS 96, ELFEN, MIMES, PASSAGE®/DEM.

Важной при использовании рассматриваемых методов является возможность визуализации моделируемых процессов с использованием систем компьютерного зрения (СКЗ) или с использованием 3D-виртуальной реальности [16, 152, 154]. Такие процессы как процесс истечения и дозирования МК, чтобы решить проблемы создания автоматизированной системы контроля в потоке основных показателей качества молотого кофе с помощью разработанных методов и математических моделей, адекватно отражающих, происходящие в дозаторах СД процессы ДМК

Метод был первоначально применён Cundall в 1971 для решения задач механики горных пород. Williams, Hocking и Mustoe детализировали теоретические основы метода [173-175].

Целесообразность этого метода в примере продукта молотого кофе обусловлена тем, что он предполагает рассмотрение поведения дискретной внутренней структуры МК в гравитационном поле и происходящие в сыпучей среде взаимодействия отдельных частиц МК. При моделировании процесса истечения МК этим методом задаются начальные положения и скорости частиц молотого кофе [176, 180].

Результаты экспериментальных данных свойств МК приведены в (п. 2.1-2.3) используются как параметры моделирования процесса истечения МК. Моделирование реальной геометрической формы частиц молотого кофе затрудняет задачи моделирования и описания правильных дифференциальных уравнения процесса истечения молотого кофе из бункера СД. Чтобы моделировать частиц МК по реальной геометрической форме, были использованы 3 поверхности фигуры (рисунок 2.16г) для определения угол внешнего трения МК.

На рисунке 2.16 показывается результаты моделирования формы частиц, диаметры частиц, высота, ширина объемной массы частиц и горка МК для определения угол внешнего трения.

Проведенный численный анализ показал, что на угол внешнего трения МК, рассчитанный методом МДЭ, существенно влияют эффективные значения коэффициентов трения скольжения f_s , который калибруется (0.3-0.8). Результаты численных экспериментов при различных значениях f_s показывают, что частицы имеют угла внешнего трения от ($27^\circ - 45^\circ$). Результаты численного анализа влияние коэффициента трения на угол внешнего трения МК представлены на рисунке 2.17.

На работах исследования сыпучих материалов (Andrade, Lim, Avila, и Vlahinic, 2012) [170], были созданы реальные геометрические формы частиц сыпучих материалов для моделирования процесса истечения по методам МДЭ,

но как результат получили, что максимальное количество анализируемых дискретных элементов очень низкое (приблизительно 20 дискретных элементов).

В нашем примере, МК имеет неправильную форму (п.2.1), чтобы увеличивать количество анализируемых дискретных частиц молотого кофе приняли форму частиц как шарики в процессе моделирования, но учитывались важные параметры физико-механических свойств МК и бункера ДС для определения скорости при процессе истечения и возможности появления процесс сводообразования [171-174].

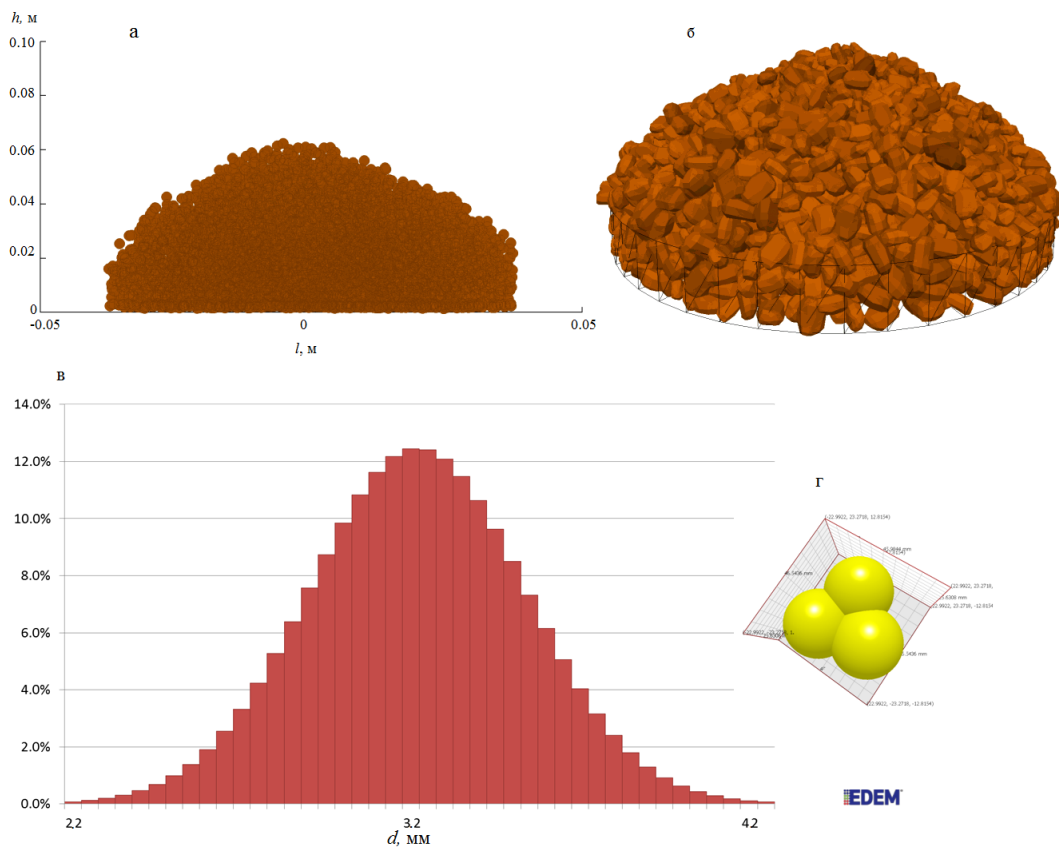


Рисунок 2.16. Проектирование частиц МК по методам МДЭ, а. высота и ширина объемной массы материала, б. горка материала на неправильной форме основания в. положение центра распределения размер частиц, г. Форма частиц

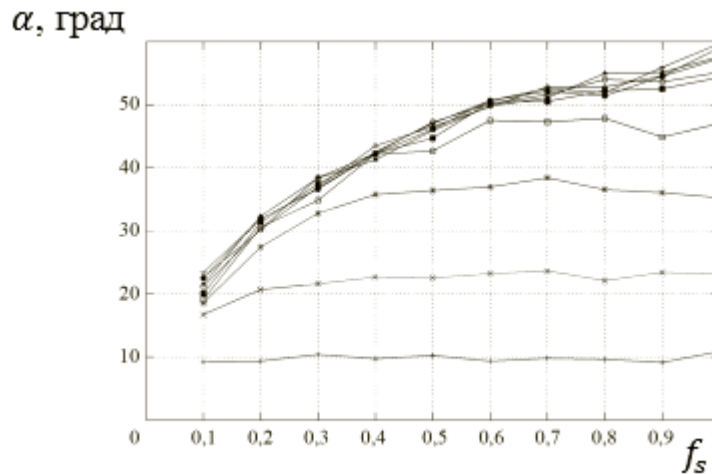


Рисунок 2.17. Расчетные значения угла внешнего трения МК с влиянием коэффициента скольжения

На рисунке 2.18а, показывается линий направления расхода молотого кофе при истечении молотого кофе из бункера с углом наклона $\beta_w = 15^\circ$ и диаметр истечения ($d = 30$ мм). Концентрированный расход молотого кофе (рисунок 2.18б) появляется регулярно, когда коэффициент внутреннего трения между частицами МК и стенок бункера больше чем коэффициент между частицами молотого кофе.

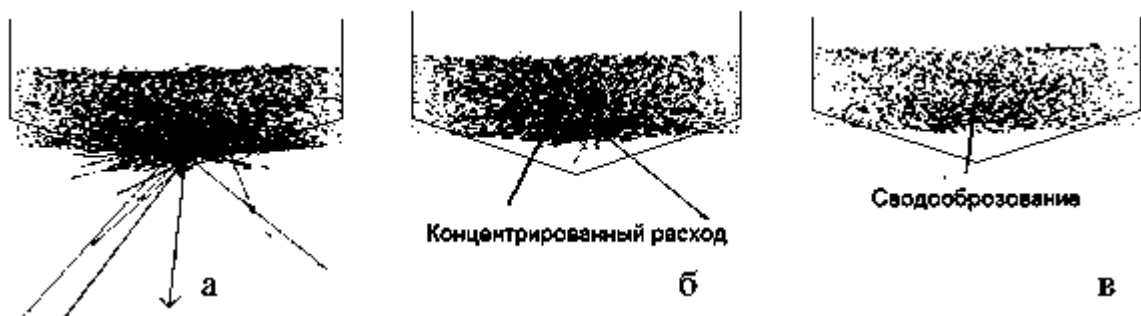


Рисунок 2.18. Процесс сводообразования при истечении из бункера мелких частиц МК (угол наклона бункера 15° и диаметр отверстия истечения = 30 мм)

На рисунке 2.19 показывается процесс сводообразования мелких частиц МК при угле наклона бункера $\beta_w = 35^\circ$ и диаметр $d = 35$ мм.

Бункеры, у которых угол наклона меньше коэффициента трения молотого кофе ($< 27^\circ$) быстрее появляется своды в процессе истечения.



Рисунок 2.19. Процесс сводообразования при истечении мелких частиц из бункера (Угол наклона бункера 35° и диаметр отверстия истечения 35 мм)

Таким образом, подтверждается, что для конструкции бункера объемного дозатора СД в процессе ДМК рекомендуется угла наклона бункера не меньше 27° с диаметром выпускного отверстия не меньше 0.10 м.

На рисунке 2.20а, б, можно наблюдать процесс сегрегация который происходит при истечении МК. Более мелкие частицы МК преобладают в центре бункера, а более крупные и мокрые частицы скатываются и накапливаются у стенок бункера.

Таким образом, более мелкие частицы МК разгружаются в первую очередь, а более крупные в последнюю очередь. При повышенной влажности молотого кофе более 6% (рисунок 2.20в), скорость истечения грубо уменьшается (ближе к нулю) и это приводит к ошибкам в процессе дозирования при длительном хранении молотого кофе в бункере СД. Скорость истечения меньше (0.1м/с).

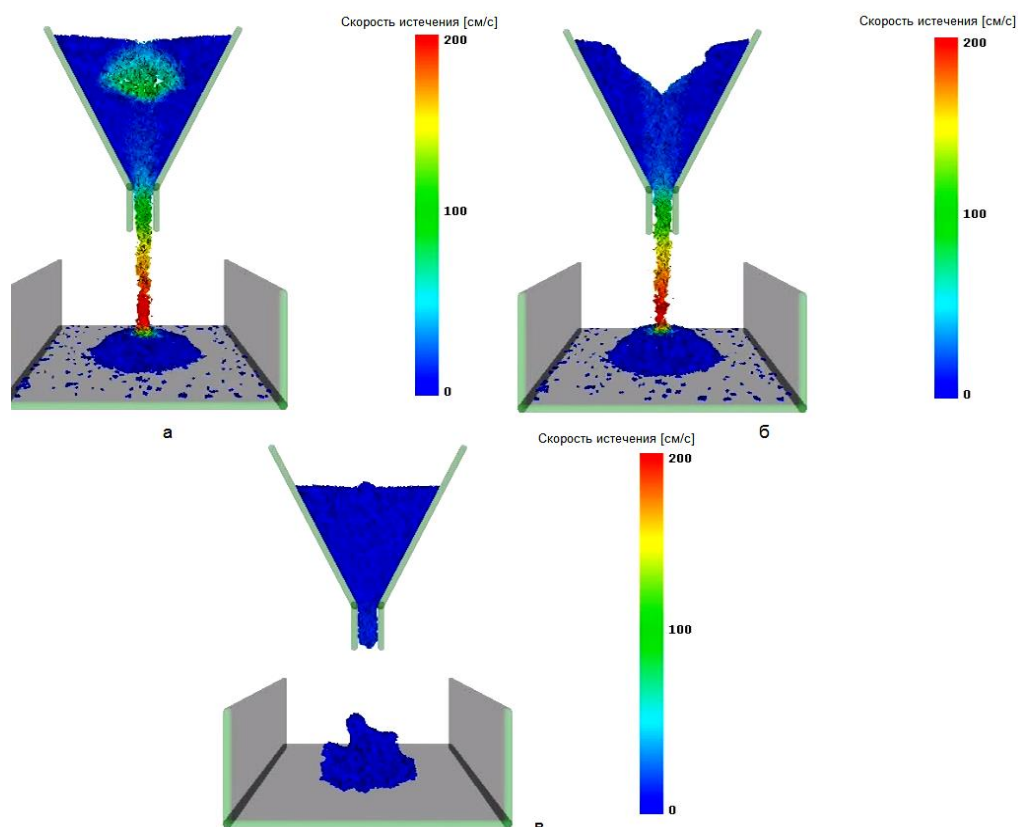


Рисунок 2.20. Скорость истечения дискретных мелких частиц МК, а. вид истечения при длительном хранении частиц молотого кофе, б. процесс сегрегации, в. при повышенной влажности.

При нормальном состоянии вида молотого кофе и правильной конструкции бункера СД для его истечения, процесс осуществляется без сводов. Результат моделирования МДЭ с углом наклона бункера $\beta_w = 31^\circ$ на рисунке 2.21. показывает, что не осуществляется процесс сводообразования и подтверждает полученных результатов проведенные аналитическим методом (п. 2.3), но есть вероятность, что в любом моменте при процессе ДМК может выдавать ошибку при изменении плотности молотого кофе и коэффициента истечения.

Скорость истечения МК по МДЭ с параметрами конструкция бункера ($d = 0.10$ м, $\beta_w = 31^\circ$) калибруется между (0.1 – 0.75 м/с).

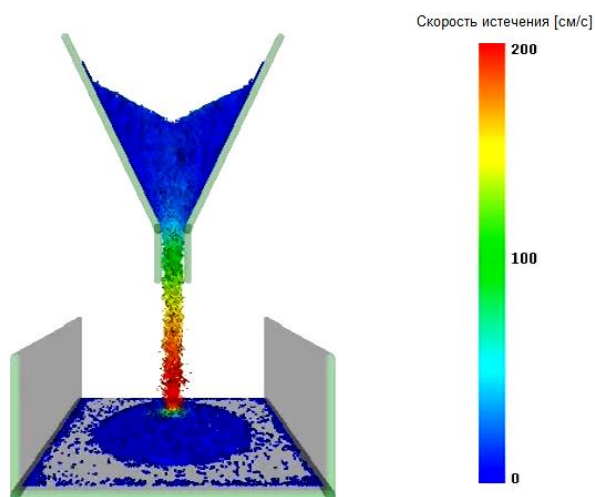


Рисунок 2.21. Скорость истечения дискретных частиц МК при угле наклона бункера $\beta_w = 31^\circ$

Результаты эксперимента по методам дискретных элементов позволило представить вид истечения частиц пищевого продукта как молотый кофе и делать вывод о том, что на скорость истечения продукта влияет первой очереди диаметр выходного отверстия бункера и коэффициент истечения частиц МК. При поддержании уровня МК, можно контролировать процесс сводообразования. Полученной величиной скорости истечения МК по МДЭ, является один из основных параметров для правильной настройки режима объемного дозатора СД и контроля застойных зон в бункере СД.

2.6. Имитационные модели процессов дозирования

Имитационные модели процессов дозирования представляет многоблочную структуру параметров, коэффициентов, передаточных функции и математических формул для расчетов и решений задач исследования процесса дозирования. Известные специалисты в области имитационного моделирования Р. Нэнси и Ф.Кивиат в своих работах определяли несколько этапов в практике развития имитационного моделирования [140].

Один из пакетов моделирования является «Matlab», разработан Кливом Моулером (англ. Cleve Moler) в конце 1970-х годов, когда он был деканом

факультета компьютерных наук в университете Нью-Мексико. Первоначально «Matlab» предназначался для проектирования систем управления (основная специальность Джона Литтла), но быстро завоевал популярность во многих других научных и инженерных областях. Он также широко использовался и в образовании, в частности, для преподавания линейной алгебры и численных методов [157].

Различные свойства молотого кофе делают проблему дозирования продукта одной из самых сложных. Для выполнения задачи дозирования молотого кофе используется принцип дискретного (порционного) дозирования. Основным направлением развития автоматических весовых дозаторов дискретного действия (порционных дозаторов) является повышение производительности и точности взвешивания каждой порции.

В работах Давиденко П.Н. рассматривается метод снижения систематической погрешности дискретного дозирования, возникающей из-за изменений пропускной способности питателя [55].

Суть предлагаемого автором метода снижения систематической погрешности заключается в непрерывной корректировке расчетной массы старта операции, прекращения набора дозы, используя текущее значение пропускной способности питателя. Автор разработал алгоритм работы системы управления дискретным дозатором для порционного дозатора зерна. Программа в диалоговом режиме дает возможность оператору задать исходные параметры для комбинационного дозирования: точность дозирования; погрешность набора массы в дополнительном бункере; погрешность набора массы в основном бункере; доза; размер основного бункера; число дополнительных бункеров; цена поверочного деления основного бункера; цена поверочного деления дополнительного бункера. Результаты моделирования показывали: доза набранная; доза взвешенная; вероятность нахождения годной комбинации; число годных комбинаций; число поверочных делений основного бункера; число поверочных делений весоизмерительной системы дополнительного бункера. Программа имитационного моделирования

позволяет производить варьирование значениями всех входных параметров модели и получать графики по всем выходным параметрам.

В работах Краснов И.Ю., рассматривается имитационная модель системы автоматизированного дозирования сыпучих материалов, включающая робастную систему управления двигателя шнековых питателей. Результаты моделирования доказывает адекватность имитационной модели дозирования, эффективность метода перенастройки параметров регулятора и целесообразность использования алгоритма фильтрации измеряемых сигналов при влиянии параметров возмущениях на двигатель шнекового питателя. В модели не учитывается наличие механических связей между двигателями и шнековыми питателями. Таким образом, при моделировании принимаются допущения, связанные с отсутствием математического описания механических и упругих связей приводов (трение, люфты и т. д.). Вследствие чего модель нельзя считать адекватной реальному процессу, однако, результаты исследований доказывают эффективность имитационного моделирования. Для этого при данном объекте управления оказалось достаточным использовать пропорционально интегральный регулятор (ПИ-регулятор) [78].

В работах Ramirez Mercedez, Fabricio Garelli, Ariel Dominguez, Modesto Angulo рассматривается имитационная модель и алгоритм контроля уровня материала в бункере. Они предлагают метод контроля уровня материала (сахар) чтобы он не вышел из заданного значения [179]. Для этого они управляют скоростью питателя с параметрами регулятора ПИ или ПИД контроля.

2.6.1. Применение методов имитационного моделирования для исследования асимптотического движения дозатора СД и контроля уровня МК

Основными методами контроля уровня молотого кофе в бункерах объемных дозаторов являются акустические и емкостные методы, используемые для формирования измерительного сигнала о значении уровня.

МК. Как правило, для регулирования уровня МК применяется позиционный закон с использованием логического выхода управляющего специализированного контроллера.

При использовании простых методов контроля и логического управления уровнем МК невозможно контролировать образование застойных зон в бункере дозатора СД и повысить однородность содержимого молотого кофе в упаковках за счет управления режимом движения. Данную задачу способны решать управляющие приборы с расширенным пространством свойств. Одним из таких свойств является способность осуществлять моделирование процесса изменения уровня МК в бункере дозатора СД.

Уровень молотого кофе как параметр состояния объемного дозатора СД и можно выделить в первом и самом грубом приближении в составе модели два базовых звена, основой для получения описаний которых служат обыкновенные дифференциальные уравнения.

По каналу «скорость вращения дозатора СД – уровень молотого кофе»:

$$ACd \frac{d^2 \omega_1}{dt^2} + B \frac{d\omega_2}{dt} = Cdh, \quad (2.32)$$

где A – коэффициент поперечной площади сечения бункера, B – коэффициент, характеризующий колебательность процесса истечения молотого кофе, C_d – коэффициент истечения молотого кофе из выходного отверстия дозатора, ω_1 – скорость вращения ротора дозатора, h – уровень молотого кофе.

По каналу «скорость вращения привода загрузки – уровень молотого кофе»:

$$T_1 \frac{d^2 \omega_1}{dt^2} + T \frac{d\omega_2}{dt} = kh, \quad (2.33)$$

где T , T_1 – постоянные, определяющие инерционность процесса загрузки, k – коэффициент заполнения бункера дозатора СД, ω_2 – скорость вращения привода загрузки бункера дозатора [116]. Предполагается, что рассмотренные уравнения не включают свободные члены, определяющие стохастический характер изменения гранулометрического состава МК; физической и насыпной

плотностей молотого кофе; когезию и адгезию частиц молотого кофе; коэффициент внутреннего трения; влажность и гигроскопичность молотого кофе.

Таким образом, управление уровнем молотого кофе в бункере по его сечению может организовываться как результат согласованного взаимодействия систем управления скоростью приводов загрузки и выгрузки молотого кофе. Данный подход позволяет рассматривать моделирование процесса движения молотого кофе в бункере как итерационную процедуру учета взаимного влияния двух простых динамических звеньев. Одно из звеньев характеризует выходную часть бункера и обладает самовыравниванием, другое характеризует бункер со стороны наполнения и самовыравниванием не обладает [115].

Методика определения параметров модели при управлении уровнем молотого кофе в бункере дозатора СД включает шаги:

1. Определяются статические характеристики бункера по каналам «уровень продукта – скорость привода дозатора» и «уровень продукта – скорость привода загрузочного конвейера». Точка пересечения данных характеристик дает начальные значения для заданных значений скоростей вращения приводов и уровня МК.

2. При заданной скорости вращения ротора дозатора СД (определяется заданной производительностью) оцениваются значения степени затухания и периода колебаний уровня МК при возмущении со стороны скорости истечения продукта.

3. Приравнивается модуль частотной характеристики зоны, истечения бункера дозатора СД (звена с самовыравниванием) значению резонансного пика, соответствующего периоду колебаний, найденному на втором шаге, и определяются коэффициенты аппроксимирующей характеристики выходной части бункера дозатора СД.

4. Для полученных значений коэффициентов определяются вариации уровня МК для заданной производительности, которые являются исходными.

5. Для скорости вращения привода подачи продукта в бункер, определенной на шаге 1 и вариаций уровня, определенных на шаге 4 определяется переходная характеристика входной зоны бункера дозатора СД при возмущении со стороны подачи продукта и определяется значение задания скорости вращения, привода загрузочного конвейера.

6. При отклонениях значения скорости, определенной на шаге 5, более чем на 5 % от желаемого, проводится итерация с изменением коэффициентов модели по шагам 2-5.

7. При выходе в зону поддержания заданного значения скорости вращения привода, подачи расчет коэффициентов модели не происходит до изменения производительности дозатора СД.

2.7. Параметрическая модель объемного дозирования МК

Учитывая проведенные выше исследования (п. 2.3 - 2.6) была спроектирована параметрическая модель объемной дозирования МК (рисунок 2.22).

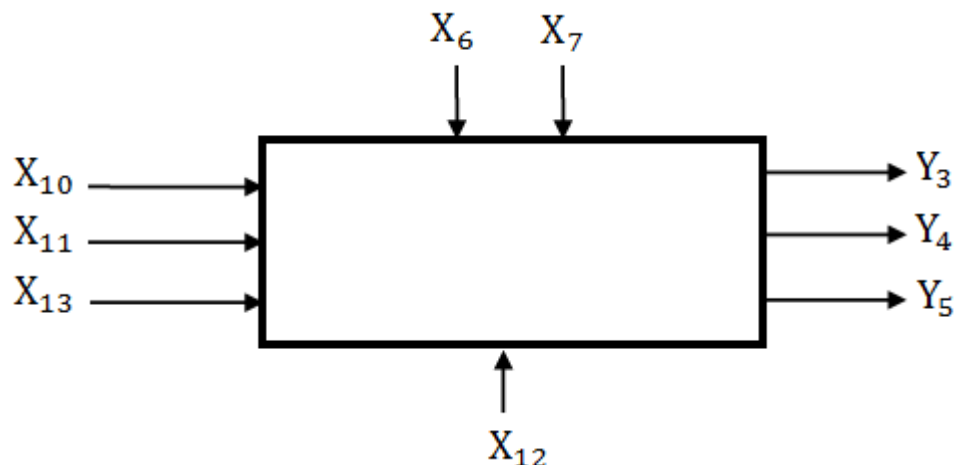


Рисунок 2.22. Параметрическая модель процесса объемного дозирования МК

ω_1 — скорость подачи МК (рад/сек) (X6)

$v_{ис}$ — скорость истечения МК (X7)

q_2 – расход молотого кофе, поступающий в СД, ($\text{м}^3/\text{с}$) (X10)

ω_2 – скорость вращения СД (рад/сек) (X11)

$X_{\text{фм}}$ – эмпирические коэффициенты, определяемые видом МК (X12)

E – коэффициент, определяемый настройкой СД, (X13)

h – уровень молотого кофе в бункере СД (0,2 – 1м) (Y3)

q_3 – Объем дозируемой порции молотого кофе в стакане СД, (м^3) (Y4)

Q – производительность СД (30-60 упак/мин) (Y5)

Рассматриваем уравнение параметров модели процесса дозирования. Параметры X_i определяют входные параметры модели, Δq – изменение расхода молотого кофе. В состав обобщенных координат бункера входят параметры соответствия бункера физико-механическим свойствам дозируемого молотого кофе.

$$Z = E + BQ + \frac{Adq}{dt}, \quad (2.34)$$

где Z – степень соответствия бункера свойствам молотого кофе, E – коэффициент, определяемый настройкой роторного дозатора как объем и форма стакана, q – расход молотого кофе, A, B – эмпирические коэффициенты, определяемые видом формы бункера и физико-механическими свойствами кофе.

Для исследования областей соответствия бункера свойствам молотого кофе производится дополнительные математические преобразования новой координаты на основе теории предельных состояний:

$$X = \frac{Z}{H_{\text{эт}}}, Cr = \frac{X(1 - X)}{1 + X}, \quad (2.35)$$

где X – безразмерная величина, определяющая степень соответствия, $H_{\text{эт}}$ – эталонная характеристика для дозатора определенного вида, Cr – критерий для выделения зоны устойчивого функционирования дозатора и управления процессом истечения [83].

2.8. Стохастические процессы, влияющие на процесс ДМК

В непрерывных процессах дозирования с уменьшением доли молотого кофе в общей массе необходимо уменьшать и его расход, но возникают трудности его непрерывной подачи в дозирующий механизм СД [130, 139].

В дискретных процессах ДМК, осуществляемое с помощью СД существует ограничение на объем мерников, вызванное нестабильностью их наполнения и опорожнения. Поэтому при дальнейшем уменьшении заданного расхода молотого кофе, увеличивают период следования импульсов, что, в свою очередь, ведет к необходимости роста сглаживающей способности СД [106].

На основании проведенных аналитических исследований и производственного опыта (п. 2.1, 2.1.1), наибольшее влияние стохастические процессы при дозировании МК оказывают: способ воздействия на массу (объем) МК, физико-механические характеристики молотого кофе, их соотношение и равномерность подачи в механизм формирования дозы (МФД) объемного дозатора СД [87]. В процессе истечения дискретных частиц МК из бункера стаканчикового дозатора (БСД) в момент открытия затворный механизм (ЗМ), движение частиц МК в нем некоторое время будет неустановившимся, так как выдерживает давление вышележащих слоев молотого кофе, а затем разрушается. Следствием этого является снижение расходных характеристик МК.

В связи с этим возникает необходимость изучения и математического описания оценочных характеристик стохастических процессов образования и разрушения сводчатых структур частиц МК при установившемся режиме истечения с целью получения их количественных характеристик.

Разрушение частиц МК может протекать по двум механизмам, объемному и поверхностному [81]. Процесс измельчения одиночной частицы молотого кофе описывается:

$$\frac{u}{c} = \sqrt[3]{\frac{6c_{об}}{\pi}} \sqrt{2(1 - \acute{d}) \frac{d_{mm}}{\mu} + 1} - \acute{d}^2; \quad b = \frac{\acute{d}}{\mu}, \quad (2.36)$$

где,

u – минимальное расстояние между двумя мелющими телами

c – среднее расстояние между двумя частицами в дисперсии

$c_{об}$ – Объемная концентрация частиц в дисперсии

d_{mm} – Диаметр мелющего тела

μ – размер частиц

$\acute{d}$ – Диаметр частицы в момент сжатия

Определение вероятности разрушения МК при многократной высокоскоростной ударной загрузке в БСД, определяется по методу построения с использованием математического аппарата цепей Маркова [133], когда необходимо контролировать распределение частиц дисперсного состава МК по размерам.

$$\{\mu_{ik}\} = ([e_{ij}] - [p_{ij}])\{\mu_{i,k-1}\} + [\lambda_{ij}][p_{ij}]\{\mu_{ij}\}, \quad (2.37)$$

$$\{\mu_{i,k-1}\}_{k-1} = \{\mu_{i0}\}, k = 1, 2, \dots n; \text{ где,}$$

$\{\mu_{ik}\}$ – матрица-столбец гранулометрического состава дозированных частиц МК, полученного в i -й момент времени, (примем, что одно дозирование происходит за один момент времени), имеет размерность (M) , при этом $\mu_{1k}, \mu_{2k}, \dots, \mu_{Nk}$ – N -й фракции в k -й момент времени. N – число фракции частиц МК. $N = 1$, соответствует самого маленького размера (тонкий помол), а N – самого большого размера частиц МК (крупный помол).

$\{\mu_{i,k-1}\}$ – матрица-столбец размером гранулометрического состава МК (M) в $(k - 1)$ -й момент времени,

$\{\mu_{i0}\}$ – матрица-столбец исходного гранулометрического состава МК, подаваемого на дозирование в первый момент времени,

$[p_{ij}]$ – диагональная матрица вероятности разрушения, имеет размерность $(M*N)$; $p_1, p_2, \dots, p_N$ – вероятности разрушения частиц соответственно 1, 2, $\frac{1}{4}$, N -й фракций МК.

$[\lambda_{ij}]$ – треугольная матрица распределения.

$$[\lambda_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & \lambda_{12} & \lambda_{23} & \dots & \lambda_{1N-1} & \lambda_{1N} \\ 0 & 0 & \lambda_{23} & \dots & \lambda_{2N-1} & \lambda_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \lambda_{N-1N} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

где, $\lambda_{12}, \lambda_{13}, \dots, \lambda_{1N}$ – вероятность образования частиц 1-й фракции при разрушении более крупных частиц соответственно 2, 3, $\frac{1}{4}$ N -й фракций, $\lambda_{23}, \lambda_{24}, \dots, \lambda_{2N}$ – вероятность образования частиц 2-й фракции при разрушении более крупных частиц соответственно 3, 4, фракций, λ_{N-1N} – вероятность образования частиц $(N-1)$ -й фракции при разрушении частиц N -й фракции. Единичная матрица $[e_{ij}]$ размером $(M*N)$.

$$[e_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, [e_{ij}] = \begin{cases} 0, & \text{если } i \neq j \\ 1, & \text{если } i = j \end{cases} \quad (2.39)$$

Так как процесс истечения молотого кофе из бункера считается случайным процессом, то моменты образования динамических сводов в сечении бункера будем рассматривать как поток однородных событий, обладающий свойствами стационарности, отсутствия последействия и ординарности. При этом под ординарностью будем понимать тот факт, что вероятность образования динамических сводов более одного раза за достаточного малого промежутка времени Δt – величина меньшего порядка малости по сравнению с Δt .

При таких предположениях закон распределения числа моментов образования динамических сводов в произвольном сечении БСД описывается известным законом Пуассона. Таким образом, вероятность образования k сводов за время t будет [136].

$$P(k, t) = \frac{(Ut)^k}{k!} \exp(-Ut), k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.40)$$

При изменении частота сводообразования U , меняется лишь время достижения вероятности при истечении молотого кофе для процесса дозирования. Таким образом, процесс разрушения сводообразования при истечении МК стохастичен и описывается.

$$\Gamma = (1 - \exp(-zt))^n dt, \quad (2.41)$$

где z – частота разрушения сводообразования.

Предложенные модели не учитывают возможность накопления повреждений в частице, в результате которых она может разрушиться. Модели на основе математического аппарата цепей Маркова не обладают памятью.

2.9. Выводы по второй главы

1. Проведено экспериментальное исследование основных физико-механических свойств МК, позволившее осуществить выбор параметров, оказывающих наибольшее влияние на качество дозирования МК. Результаты экспериментальные исследования формы и размера частиц молотого обжаренного кофе в оборудовании «НТ-educator» показали, что частицы имеют неправильные формы, что усложняют описать математическую модель процесса истечения молотого кофе в дозирующее устройство.

2. Результаты исследования сыпучести МК, полученные на трибометре, показывали, что мелкофракционные частиц МК являются связным материалом, так как сопротивление сдвигу τ_0 больше нуля. Насыпная плотность МК практически не влияет на численные значения коэффициентов внешнего трения (рисунок 2.9). При увеличении нормального напряжения в зоне сдвига на 15 % увеличивается коэффициент внутреннего трения не более, чем на 2–3 %.

3. Предложена модель определения скорости свободного истечения МК из БСД (см. форм 2.1) с учетом физико-механических свойств МК и параметров конструкции БСД с помощью, которой позволяет выявить параметры бункера,

обеспечивающего стабильность истечения молотого кофе без сводообразования и правильно настроить объемный дозатор СД для эффективности оценки качества МК. Проведенные расчеты позволило, определить характерные зависимость скорости истечения от параметров конструкции бункера и от физико-механических свойств МК.

4. Результаты анализа аналитических подходов к моделированию процесса истечения молотого кофе из БСД показывает, что вид истечения молотого кофе отличается от жидкостей наличием коэффициента внутреннего трения, силы сцепления, а также осуществляются напряжения на стене цилиндриконической бункера объемного дозатора СД, что усложняет описать дифференциальные уравнения процесса истечения МК из БСД. При этом описанные уравнения сил напряжений и давления в бункере цилиндриконической формы (см. формулы 2.17-2.19). Определены геометрические размеры и параметры конструкция бункера объемного дозатора, чтобы обеспечить устойчивое течение молотого кофе.

5. Результаты моделирования дискретных частиц МК по методам дискретных элементов (МДЭ), позволило визуализировать моделируемых процессов с использованием систем компьютерного зрения (СКЗ) или 3D-виртуальной реальности для процесса истечения МК, но реальная геометрическая форма частиц МК затрудняет задачи моделирования в процессе истечения. При этом с учетом физико-механических свойств МК и параметров конструкции бункера, проведенный анализ показал, что на угол внешнего трения МК существенно влияют эффективные значения коэффициентов трения скольжения f_s . Практика показало, что при применении эффективных значений коэффициента скольжения, дает возможность моделировать частиц МК с различными гранулометрическим составом и формой частиц МК по методам дискретных элементов.

6. Разработанные имитационные модели Краснов и Давиденко не рассматривают физико-механические свойства материала как параметры возмущения, которые влияют на процесс дозирования пищевых продуктов.

Поэтому необходимо добавить контур управления параметров свойств материала в модели для исследования и описание модели процесса объемного дозирования молотого кофе.

7. Предложена методика определения параметров модели (п. 2.3.1) при управлении уровнем молотого кофе в бункере дозатора СД для моделирования и исследования асимптотического движения дозатора СД и контроля уровня МК.

8. Проведенные математические описания разрушение частиц и оценочных характеристик стохастических процессов образования и разрушения сводчатых структур частиц МК и разработки структурно-параметрических моделей процессов истечения (п. 2.1) и дозирования частиц МК (п. 2.3), позволяют определить основные режимные и технологические параметры, чтобы перейти к разработке математическим моделям процесса объемного дозирования с использованием интеллектуальных технологий схем автоматизации процессов производства МК, оптимизации технологических режимов и управления производственным процессом на современном уровне.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДОЗИРОВАНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

3. 1. Критерии управления процессом дозирования

В каждой операции технологического процесса производства МК существует какой-либо критерий качества. Это может быть определенное качество продукции, максимальная выгода или производительность или один из многих других параметров оценки. Задачей САР является поддержание переменных параметров на таком уровне, чтобы выходной параметр каждого процесса находился внутри области значений, диктуемых критерием качества регулирования [80, 59].

В процессе дозирования производства МК предъявляются такие требования как точность в установившихся режимах, требования к устойчивости, требования к качеству переходных процессов [102].

Точность дозирования зависит от многих факторов: неравномерности подачи молотого кофе в механизм дозирования; вздрагивания механизма дозирования и фундаментов; вариативности молотого кофе (удельный вес, размер, неоднородность, насыпная плотность, гигроскопичность, текучесть, способность к сводообразованию); непериодические изменяющиеся свойства молотого кофе.

Критерий устойчивости по виду переходной характеристики (переходного процесса), является устойчивой, если переходный процесс затухает. Однако система может быть устойчивой, но ее переходные процессы, в зависимости от изменения параметров, будут сильно различаться [39, 46]. Эти процессы существенно отличаются по виду, имеют разные частоту колебаний, время завершения, амплитуду отклонения от заданной величины. В связи с

этим возникает необходимость сравнения, оценки устойчивых временных характеристик систем управления процессом ДМК.

С точки зрения управления процессом дозирования молотого кофе, в качестве составляющих критерия управления рассматриваются производительность объемного дозатора. К основным характеристикам дозатора СД относятся: тип дозируемого молотого кофе, количество мерных стаканов, диапазон варьирования объема мерного стакана, производительность, потребляемая мощность, масса и габариты, вид упаковочного материала (тары).

В пусковом режиме и режиме останова в качестве критерия управления обычно рассматривается время пуска/останова с ограничениями на показатели качества МК. Ниже рассматриваются, предложены критериальные зависимости для управления дозатором СД в автоматическом рабочем режиме. Первоначально в качестве критерия управления выбирается заданная производительность технологической линии с наложенными на нее ограничениями на колебания массы МК в упаковке [125]:

$$Q = Q_{\text{зад}} \pm \Delta Q, \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (m_i - m_{\text{зад}})^2} \leq \Pi, \quad (3.1)$$

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

Уравнение (3.1) как и представления структуры системы управления также трансформируются 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).

$$\omega_{1\text{зад}} = f1(q_1, q_2), \omega_{2\text{зад}} = f2(q_1, q_2), \quad (3.2)$$

$$\omega_1 = F1(e_1), \omega_2 = F2(e_2),$$

$$e_1 = \omega_1 - \omega_{1\text{зад}}, e_2 = \omega_2 - \omega_{2\text{зад}},$$

$$F3(Q_{\text{зад}}) = \omega_{1\text{зад}} - \omega_{2\text{зад}},$$

где $\omega_{1\text{зад}}, \omega_{2\text{зад}}$ – 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 основе иерархической модели структуры системы автоматического дозирования молотого кофе (п. 1.11 см. рисунок 1.14) и коэффициенты информативных параметров состояния технологического процесса производства МК (п.2.2 и п.2.7) определяются управляющие переменные для построения имитационной модели ДМК. Технологическую систему управления объемным дозированием производства молотого кофе с параметрами контроля в общем виде можно представить в виде графа на рисунке 3.1.

В устройство подачи кофе (УПК), контролируются скорость привода подачи МК в бункер $X6(\omega_1)$, и объем МК в начале процесса $X2(q_0, q_1)$.

$$q_0(t) = L \omega_1(t) \rho, \quad (3.3)$$

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 интересует значения расхода $q_1 \cdot q_1 = q_0$.

Бункер дозатора (БСД) заполняется материалом МК, где контролируются уровня МК $Y3(h)$, коэффициент истечения $X3(Cd)$, плотность МК $X8(\rho)$. Объем МК в бункере определяется по формуле (3.4).

$$V(t) = DHh(t)\rho \quad (3.4)$$

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

$$\dot{h} = \frac{1}{DH\rho} (q_1(t) - Dq_2), \quad (3.5)$$

Если взять интеграл, считая начальное условие (0) получаем:

$$h(t) = \frac{1}{DH\rho} \int (q_1(t) - Dq_2(t)) dt \quad (3.6)$$

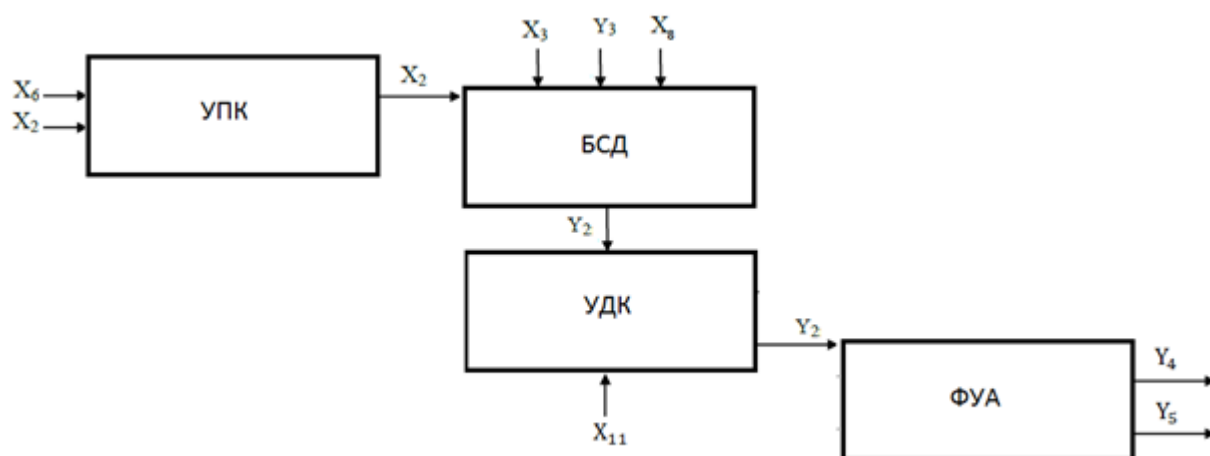


Рисунок 3.1. Структурная схема выбранных параметров технологической системы управления процессом ДМК

В результате Y_2 (q_2) поступает в устройство дозирования кофе (УДК), в стаканах заданных значений объема порции МК Y_4 (q_3), где контролируется скорость дозатора X_{11} (ω_2) для процесса дозирования и дальнейшие упаковки.

$$q_2(t) = \omega_2(t) \rho v_{\text{и}} \quad (3.7)$$

где, $q_2(t)$ – расход МК из бункера от времени t , ω_2 – скорость привода СД, ρ – плотность МК, h – уровень МК, $v_{\text{и}}$ – скорость истечения МК.

$$q_3(t) = \frac{\omega_2(t) \rho m_i}{\omega_1} \quad (3.8)$$

Неравномерность подачи молотого кофе в УДК является важнейшим фактором, влияющим на производительность фасовочно-упаковочного автомата (ФУА). Для качественной оценки дозирования, контролируется

величины значения промежуточной координаты и скоростей приводов УДК и УПК. Точность дозирования стаканчикового дозатора обуславливается техническими требованиями и ограничивается технологическим допуском [4, 45].

$$dE = \frac{Q_{\text{мак}} - Q_{\text{мин}}}{Q_{\text{ср}}}, \quad (3.9)$$

где $Q_{\text{мак}}, Q_{\text{мин}}, Q_{\text{ср}}$ – максимальная, минимальная и средняя производительность стаканчикового дозатора, $\text{м}^3/\text{с}$, при работе на одну и ту же установленную дозу сыпучего материала. Практика показало, что при выбранных трубчатых мерных стаканов дозатора незначительно повышают точность дозирования путем упорядочения расположения частиц МК зависимости от величины объема массы продуктов МК дозы в интервале (0.5 – 1%) при норме точности 3%.

В процессе упаковки продуктов МК, чтобы повысить производительность дозатора СД необходимо снизить время передачи продукта в пакет упаковки. В общем случае, скорость работы стаканчикового дозатора зависит от времени $t_{\text{доз}}$ образования дозы МК и передачи ее в пакет.

При каждой конкретной операции в ТП кофе, время t находится в прямой зависимости от последовательности этапов операций при процессе ДМК, таких операций как: заполнение мерной стаканов t_3 , передачи продукта в пакет $t_{\text{п}}$, а также конфигурация мерной стаканов V_{vt} , форма передающего канала, классификационный показатель скорости дозирования [94].

В общем случае это можно представить в виде функциональной зависимости [105]:

$$t = f(t_3, t_{\text{п}}, V_{vt}) \quad (3.10)$$

Цикл работы ФУА $T_{\text{ф}}$ согласуется с циклом работы дискового стаканчикового дозатора $T_{\text{сд}}$, тогда.

$$t_{\text{р}} + t_0 = t_3 + t_{\text{п}}, \quad (3.11)$$

где t_p, t_o – время рабочего хода ФУА, время остановки рабочих органов ФУА, t_3, t_{π} – время заполнения стаканов СД и передачи МК в упаковку. Именно время заполнения мерных стаканов t_3 значительно влияет на производительность СД при ТП продуктов МК. Частицы МК из стакана в пакет является связей лимитирующим и должно удовлетворяться следующее неравенство:

$$t_3 < t_{\pi} \leq t_o \quad (3.12)$$

Неравенство (3.12) показывает, что для согласованной работы ФУА ее цикл следует сопоставлять с максимальной по длительности операцией: $T_{\phi} \geq t_{\pi}$. В горизонтальных машинах ФУА для согласования времени периодов можно увеличить количество мерных стаканов дозатора (число параллельных доз МК), каждый из которых выгружает продуктов МК в свой пакет при непрерывном без остановок перемещении стаканов вместе с пакетами. Так как рассматриваются вертикальные машины ФУА, то теоретическая производительность выраженная, через параметры дозатора СД определяется формулой:

$$Q = \frac{\omega_2}{\varphi_{\pi} \omega_1} K_{\text{вы}} \quad (3.13)$$

Где Q – производительность процесса ДМК, ω_2 – скорость дозатора СД, ω_1 – скорость привода питателя из УПК, φ_{π} – угол поворота мерных стаканов вместе с дисками дозатора СД по времени передачи в пакет t_{π} , $K_{\text{вы}}$ – коэффициент передающего канала выгрузки доз в пакет. Тогда дозатор СД с одним неподвижным передающим каналом выгрузки доз продуктов МК будет являться частным случаем, где $K_{\text{вы}} = 1$.

Наивысшая точность дозы будет в трубчатой емкости. Для практических целей целесообразно выбрать трубчатую емкость в виде стакана с показателем формы: $\text{Пф} = 0,43 + 0,65$ [95, 96].

3. 2. Применение методологии управления приводом в технологическом процессе производства молотого кофе

Жесткие требования к качественным показателям МК. Движения многих технологических объектов в процессе производства молотого кофе определяют необходимость применения адаптивного управления исполнительными электромеханическими системами на стадии дозирования.

В технологическом процессе производства молотого кофе используются разные приводы в качестве исполнительных механизмов. Объемные дозаторы состоят из питателя, приборов и устройств, определяющих количество порции молотого кофе, пропускаемого и пропущенного через питатель, а также приборов регулирования.

Обеспечение заданных условий истечения молотого кофе реализуется посредством управления приводами параметрами электропривода системы объемного дозирования молотого кофе. Специфичность электромеханических параметров электропривода процесса объемного дозирования проявляется в том, что эти параметры зависят от физико-механических характеристик дозируемого молотого кофе. Нестационарный характер возмущений технологических факторов процесса производства молотого кофе осложняет управление процессом дозирования в целом. Сложности настройки приводят к функциональным ограничениям процесса объемного дозирования, обусловленными уменьшением возможностей стабильной работы дозатора в требуемом диапазоне параметров дозирования молотого кофе.

Для контроля работа приборов, используется блок управления как модуль, на котором задаются параметры задания. Параметрами задания в данном случае является производительность объемного дозатора СД, скорость привода питателя для подачи молотого кофе. Регулирование производительности осуществляется путем изменения скорости подачи, объема дозатора. Для подачи молотого кофе в бункер объемного дозатора выбран

ленточный конвейер обеспечивающим приводом (D_1) с постоянной скоростью. Двигатель (D_2) для привода объемного дозатора СД.

Зависимости от функционирования ленточного конвейера, нуждается перенастроить скорость вращения привода питателя для режимов стартера, работы и остановка системы управления. Для скорости вращения привода подачи молотого кофе в бункер, определяется переходная характеристика входной зоны бункера стаканчикового дозатора при возмущении со стороны подачи молотого кофе и определяется значение задания, скорости вращения привода загрузочного конвейера [21].

При заданной скорости вращения стаканчикового дозатора определяется заданной производительностью, оцениваются значения степени затухания и периода колебаний уровня при возмущении со стороны скорости истечения молотого кофе.

Управления скоростью вращения приводов в УПК и УДК осуществляется в зоне рабочего участка механической характеристики, т.е. Передаточная функция двигателя по каналу частота питающей сети – скорость вращения включает произведение двух компонент (формула 3.14). Первая описывает электромеханическую составляющую, вторая – механическую составляющую. Оба звена – апериодические звенья первого порядка.

$$W_{эд(s)} = \frac{K_{дв}}{T_э s + 1}, \quad W_{мех(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (3.14)$$

$$D_{i(s)} = \frac{K_{дв} K}{(T_э s + 1)(Ts + 1)} \quad (3.15)$$

Формула (3.15) описывает передаточную функцию двигателей электрических приводов подачи и объемного дозатора, где $K_{дв}$ – коэффициент передачи двигателя; K – коэффициент передачи механической составляющей двигателя $T_э$ – постоянная времени электромагнитной составляющей двигателя; T – механическая постоянная времени двигателя.

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

$$w_{\text{тп}}(s) = \frac{K_{\text{пр}} e^{\tau p}}{T_y s + 1} \quad (3.16)$$

$K_{\text{пр}}$ — статический коэффициент усиления преобразователя, T_y — постоянная времени системы импульсно-фазового управления.

Для исследования управления приводами, выбраны двигатели с максимальными скоростями 1700 об/мин. Чтобы правильно выбрать характеристики двигателей приводов УПК и УДК (см. рисунок 3.1), учитываются характеристики питателя и дозатора, например конвейер и стаканчиковый дозатор исходя и соответствия конструкция характеру подачи и дозируемого продуктов молотого кофе, которые определяются его физико-механическими свойствами.

3. 3. Уровень кофе в бункере как промежуточная координата процесса управления дозированием МК

При проектировании систем управления дозаторами молотого кофе перемещение материала рассматривается как квазипериодическое возникновение и разрушение сводов по всему объему молотого кофе. Для стабилизации границ устойчивости движения МК на границах различных зон течения при управлении процессом дозирования предлагается введение цели управления направленной на стабилизацию режима истечения МК из бункера СД посредством управления промежуточной координатой:

$$\omega_{1\text{зад}} - \omega_{2\text{зад}} = F4(Q_{\text{зад}}, h_{\text{пр}}, L), h_{\text{пр}} = h_{\text{зад}} \pm \Delta h, \quad (3.17)$$

где $h_{\text{пр}}$ — 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. В состав множества L входят: гранулометрический состав; физическая и насыпная плотности молотого кофе; изменение насыпной плотности молотого кофе под действием сжимающего усилия; твердость, когезия и адгезия частиц молотого

кофе; углы естественного (коэффициент внутреннего трения) и динамического откоса; влажность и гигроскопичность молотого кофе. Дополнительно учитываются: диаметр и высота бункера; материал стенок бункера; диаметр и форма выпускного отверстия дозатора.

Принимается допущение, что на основе решения уравнения (3.17) для заданных свойств порошковых и зерновых частиц МК и определенной конструкции дозатора можно обеспечить устойчивость режима истечения порошковых и зерновых частиц МК, без образования стволовых режимов течения и застойных зон в объеме бункера при стабилизации уровня МК. Таким образом, в качестве координаты может рассматриваться уровень молотого кофе в бункере, поддерживаемый в пределах, не приводящих к образованию застойных зон для заданных вида стаканчикового дозатора и физико-механических свойств молотого кофе.

Основными методами контроля уровня молотого кофе в бункерах объемных дозаторов являются акустические и емкостные методы, используемые для формирования измерительного сигнала о значении уровня. Как правило, для регулирования уровня применяется позиционный закон с использованием логического выхода управляющего специализированного контроллера.

3. 4. Разработка нейросетевой модели для управления процессом дозирования МК

При разработке нейросетевой модели (НСМ) для решения задачи контроля уровня МК в бункере, приводов питателя и стаканчикового дозатора в первую очередь необходимо выбрать наиболее подходящий тип и архитектуру НС.

Результат, анализа обучения сети типа многослойного персептрона с одним скрытым слоем является оптимальной архитектурой НС для процесса ДМК, так как в выборе структуры НС в соответствии со сложностью решаемой

задачи процесса ДМК, оказался значительно лучше, чем при использовании сети однослойного типа из-за их низкой вычислительной способности.

Для того чтобы НС была способна выполнить поставленную задачу, ее необходимо обучить. Количество скрытых слоев для НС типа многослойный персептрон определялось экспериментальным путем в среде пакета «Matlab» с учетом теоретического обоснования. Количество нейронов каждого слоя, способствует получению наименьшей ошибки во время функционирования искусственной нейронной сети (ИНС) для процесса ДМК.

При формировании обучающей выборки НС (рисунок. 3.2) для процесса ДМК использовались только информативные параметры и алгоритм обучения с учителем.

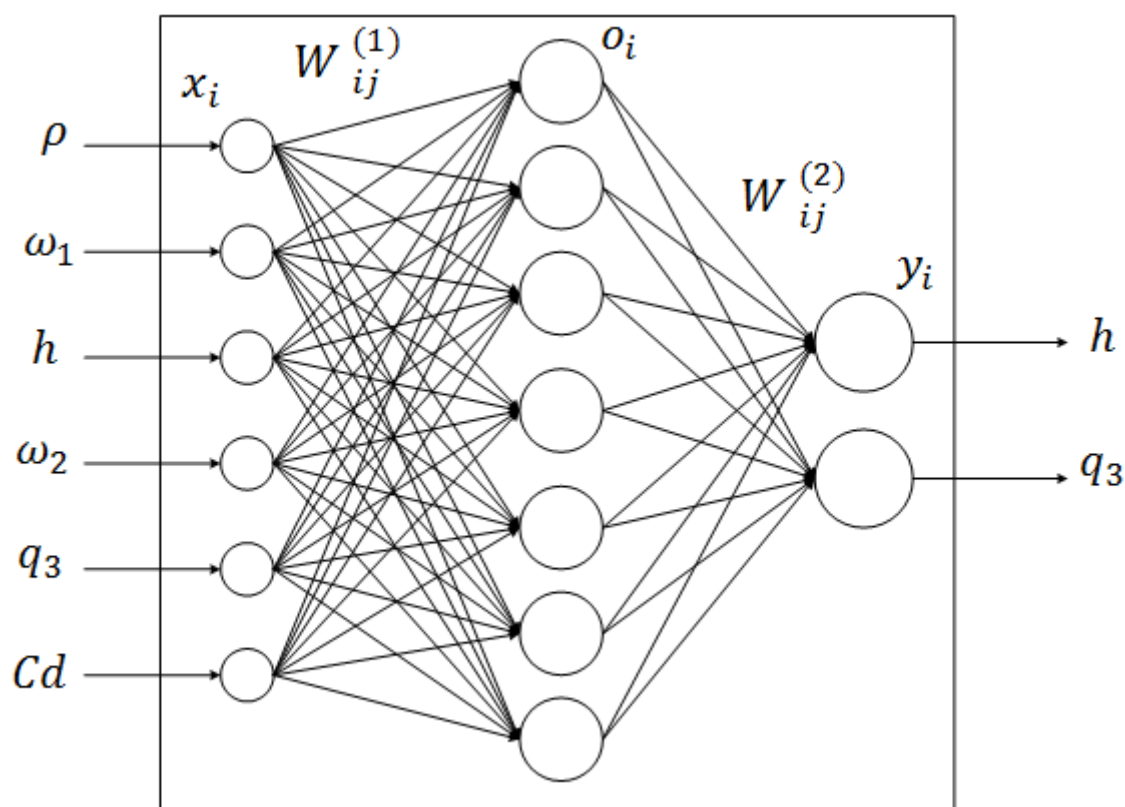


Рисунок 3.2. Структура разработанной нейронной сети, типа многослойный персептрон с одним скрытым слоем для процесса ДМК

Процесс обучения алгоритма с учителем представляет собой предъявление сети выборки обучающих параметров свойств x_i , процесса ДМК.

Каждый параметр подается на входы сети, затем проходит обработку внутри структуры НС, вычисляется выходной сигнал сети y_i , который сравнивается с соответствующим значением целевого вектора, представляющего собой требуемый выход сети. Затем по определенному правилу вычисляется ошибка, и происходит изменение весовых коэффициентов связей внутри сети $W_{ij}^{(1)}, W_{ij}^{(2)}$ в зависимости от выбранного алгоритма. Векторы обучающего множества предъявляются последовательно, вычисляются ошибки и веса подстраиваются для каждого вектора до тех пор, пока ошибка по всему обучающему массиву не достигнет приемлемо низкого уровня [112, 82, 186, 187, 188].

На вход НС подавалась одинаковая обучающая выборка. Для реализуемой сети выходного сигнала i -го нейрона скрытого слоя o_i и функции активации нейронов ϕ_i в общем виде будет иметь вид [138]:

$$o_i = f \left(\phi_i \sum_{i=1}^n x_i W_{ji}^{(1)} \right)$$

$$o_i = f \left(\phi_i + \rho W_{1i}^{(1)} + \omega_1 W_{2i}^{(1)} + q_3 W_{3i}^{(1)} + h W_{4i}^{(1)} + \omega_2 W_{5i}^{(1)} + C d W_{6i}^{(1)} \right) \quad (3.18)$$

Выходные слои, где контролируется значение величины уровня, h и порции МК q_3 будет справедливо следующее:

$$y_i = f \left(\phi_i + \sum_{j=1}^n o_j W_{ji}^{(1)} \right) \quad (3.19)$$

Тогда из (3.19) значения величины h и q_3 будут:

$$h = f \left(\phi_i + \sum_{i=1}^n o_i W_{ji}^{(1)} f \sum_{j=1}^n W_{ji}^{(2)} \right), q_3 = f \left(\phi_i + \sum_{i=1}^n o_i W_{ji}^{(1)} f \sum_{j=1}^n W_{ji}^{(2)} \right) \quad (3.20)$$

Формулы (3.20.), показывают, что на выходных значениях сигналов влияют веса обоих слоев, тогда как сигналы, вырабатываемые в скрытом слое, не зависят от весов выходного слоя. Если выбирать, сигмоидальную

униполярную форму в качестве функции активации нейронов ϕ_i , тогда получаем для выходных значениях y_i .

$$y_i = \frac{1}{1 + \exp\left(-\sum_{j=1}^n W_{ji}^{(2)} \left(\frac{1}{1 + \exp\left(-\sum_{j=1}^n o_j W_{ji}^{(1)}\right)} \right)\right)} \quad (3.21)$$

Чтобы контролировать образование застойных зон в бункере дозатора СД и повысить однородность содержимого молотого кофе в упаковках за счет управления режимом движения приводов УПК и УДК принимается метод основанного на работе НСМ с ПИД контроллером.

Недостатками нейронных сетей являются невозможность предсказания погрешности регулирования для воздействий. Таким образом, так как процесс управления дозированием МК нелинеен, сложен и не может быть идентифицирован, то решить задачу управления можно с помощью нейросетевого регулятора. Результаты экспериментов показали, что применение методологии управления приводами для процесса дозирования при использовании простых методов контроля и логического управления уровнем молотого кофе невозможно [141]. Структура системы автоматического регулирования с ПИД регулятором и нейронной сетью в качестве блока автонастройки показана на рисунке 3.3. Нейронная сеть НС в данной структуре играет роль функционального преобразователя, который для каждого набора сигналов u_i вырабатывает коэффициенты ПИД регулятора K_p, K_i, K_d [56].

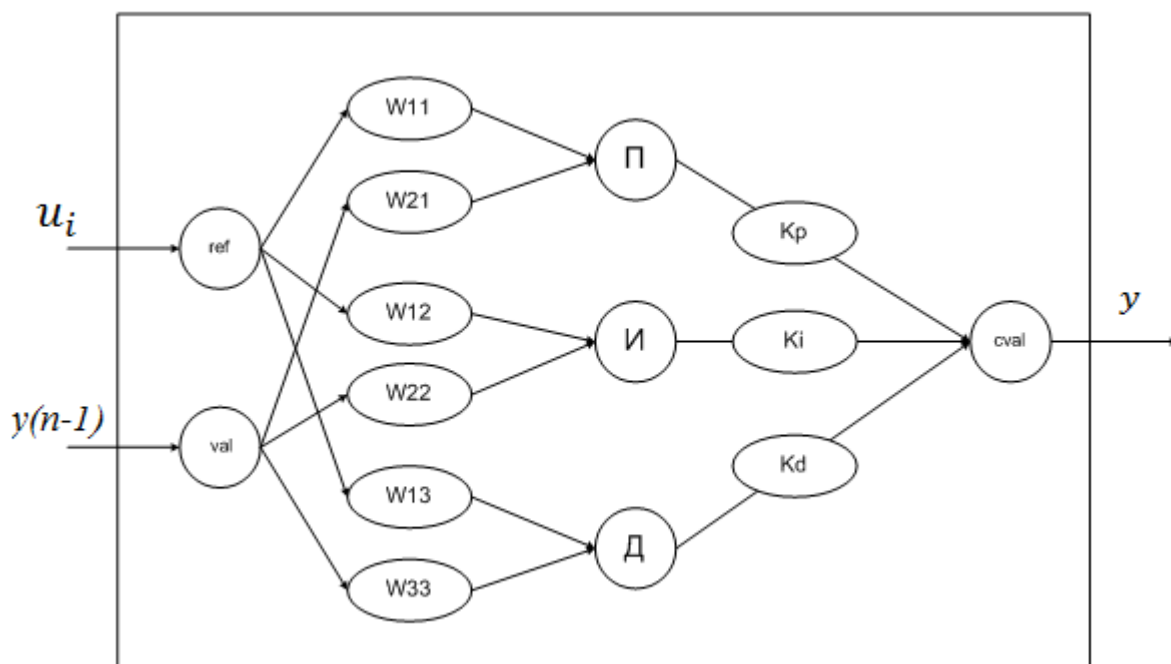


Рисунок 3.3. Структура нейронной сети, типа многослойный персептрон с одним скрытым слоем - ПИД контроллером

Процесс поиска неизвестных параметров нейронов $W_{ij}^{(k)}$ является итерационным, на каждой итерации находят все коэффициенты сети по методу обратного распространения ошибки, который является одним из наиболее эффективных методов обучения многослойных нейронных сетей.

На основе полученных структур (см. рисунки 3.2 и 3.3) построена структура нейронной сети, типа многослойный персептрон с одним скрытым слоем - ПИД контроллером для автоматизации процесса управления объемным дозированием продуктов МК на рисунке 3.4 и является наиболее перспективной для решения поставленных задач.

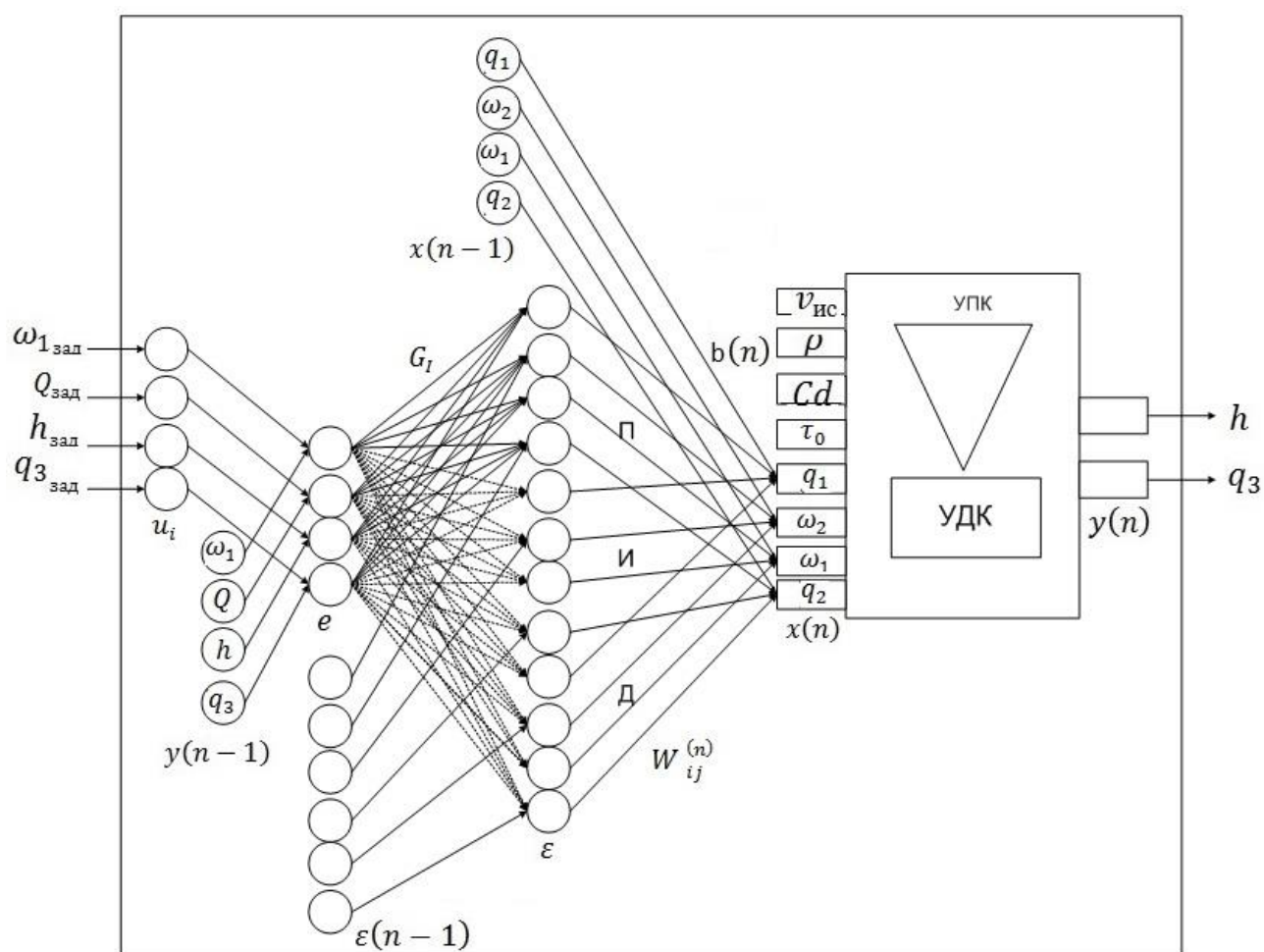


Рисунок 3.4. Структура разработанной нейронной сети, типа многослойный персептрон с одним скрытым слоем - ПИД контроллером управления процессом объемного дозирования МК.

Входной вектор структуры НС состоит из элементов схемы (см. рисунок 3.1), данных автоматических измерений, характеризующих состояние ТП 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 . Текущее рассогласование выходного сигнала процесса ДМК определяется по формуле.

$$e = (x_i - y(n)), \quad (3.22)$$

Скрытый слой состоит из текущего рассогласования последнего значения времени ПИД контроллера $\varepsilon(n-1)$, 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 матрица G_I , где между контурами управления уменьшается мгновенная ошибка регулирования ПИД контроллера ε и определяет ошибки в последних двух временных шагов в формуле (3.23).

$$\varepsilon = G_I e \quad (3.23)$$

Как возмущающие факторы $b(n)$, рассматриваются скорость истечения продукта v_{uc} , физико-механических свойств как коэффициент истечения частиц МК Cd и плотность кофе ρ . Текущие значения входных параметров процесса ДМК $x(n)$ и выходной сигнал ПИД контроллера ε обеспечивают высокое качество регулирования и позволяет оптимизировать управление по отдельным критериям. Таким образом, для реализуемой сети выходного сигнала i -го нейрона скрытого слоя ПИД контроллера определяются по формуле (3.24) с помощью процедуры обратного распространения.

$$\begin{aligned} x_i(n) = & x_i(n-1) + W_{ij}^{(n)} \varepsilon_i(n) + W_{ij}^{(n-1)} \varepsilon_i(n-1) \\ & + W_{ij}^{(n-2)} \varepsilon_i(n-2), \end{aligned} \quad (3.24)$$

где, $W_{ij}^{(n)}, W_{ij}^{(n-1)}, W_{ij}^{(n-2)}$ – Общие постоянные переменные, определяемые параметрами подстройка ПИД контроллера для разных контуров управления скоростью приводов, уровня МК, порции объема МК.

Тогда весовые коэффициенты связей внутри сети для контуров управления скоростью приводов и объема МК определяются по формуле (3.25).

$$W_{ij}^{(n)} = \begin{pmatrix} W_{q_1 0} \\ W_{q_2 0} \\ W_{q_1 1} \\ W_{q_2 1} \\ W_{q_1 2} \\ W_{q_2 2} \\ W_{q_1 3} \\ W_{q_2 3} \\ W_{q_1 4} \\ W_{q_2 4} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} W_{w_1 0} \\ W_{w_2 0} \\ W_{w_1 1} \\ W_{w_2 1} \\ W_{w_1 2} \\ W_{w_2 2} \\ W_{w_1 3} \\ W_{w_2 3} \\ W_{w_1 4} \\ W_{w_2 4} \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

Выходные сигналы из системы автоматизации процесса управления дозированием МК будут.

$$h = u_h + \sum_{i=1}^n x_i(n) W_{ij}^{(n)} + x_i(n-1) W_{ij}^{(n-1)} \quad (3.26)$$

$$q_3 = u_{q_3} + \sum_{i=1}^n x_i(n) W_{ij}^{(n)} + x_i(n-1) W_{ij}^{(n-1)} \quad (3.27)$$

Рассчитывается ошибка сети для выходного слоя по формуле:

$$\delta x_i = f'(x_i) \sum_{j=1}^n \delta y_j \frac{dy_j}{dx_i} \quad (3.28)$$

Таким образом, применение метода, основанного на работе НСМ с ПИД контроллером, позволяет работать с наборами входных параметров любого уровня декомпозиции и учитывать влияние каждого параметра возмущений на оценку качества величины уровня и объемной порции МК с помощью значений весовых коэффициентов [24].

Полученные значения сравниваются с контрольными показателями путем статистической обработки данных, в результате чего рассчитывается

отклонение величины уровня МК от эталонного и выдается результат о соответствии этого показателя заданному значению для выполнения дальнейших операций по производству продуктов МК.

Для данной системы минимальная ошибка обучения составила 1.04%, что укладывается в предел допустимой погрешности, определенный 1.5%. Предел допустимой погрешности был выбран и согласован с технологами, отвечающими за качество продукции линии по производству продуктов молотого кофе в Эквадоре.

3. 5. Имитационная модель системы управления процессом дозирования молотого кофе

В результате анализа проведенных в (п. 3.4) была создана модель системы управления процессом дозирования молотого кофе.

Модель системы управления процессом дозирования молотого кофе представляет многоблочную структуру [91, 75, 76]. Количество блоков соответствует числу компонентов в процессе в среде моделирования «Matlab simulink» на рисунке 3.5. В случае применения для регулирования скоростей питателя и дозатора частотных преобразователей возможно для управления приводами использовать классические ПИД регуляторы. При оценке поведения дозатора при действии возмущений с использованием в качестве САЕ системы среды Matlab используется представление привода в виде последовательного включения двух апериодических звеньев [79, 99, 104, 146].

В схеме имеется контур управления привода питателя, контур управления привода дозатора СД и бункер цилиндрической формы.

Согласно результатам анализа в главе 2, где предлагается контролировать уровень МК как промежуточная координата в бункере стаканчикового дозатора, описывается математическое ожидание порции МК в мерных стаканах объемного дозатора (формула 3.29).

Математическое ожидание объема порции продукта МК определяется по формуле.

$$m_i = X_{\phi_m}(t - t_i) - u(t - t_i) \quad (3.29)$$

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 – запаздывание при воздействии управляющего сигнала промежуточной координаты и скоростей приводов.

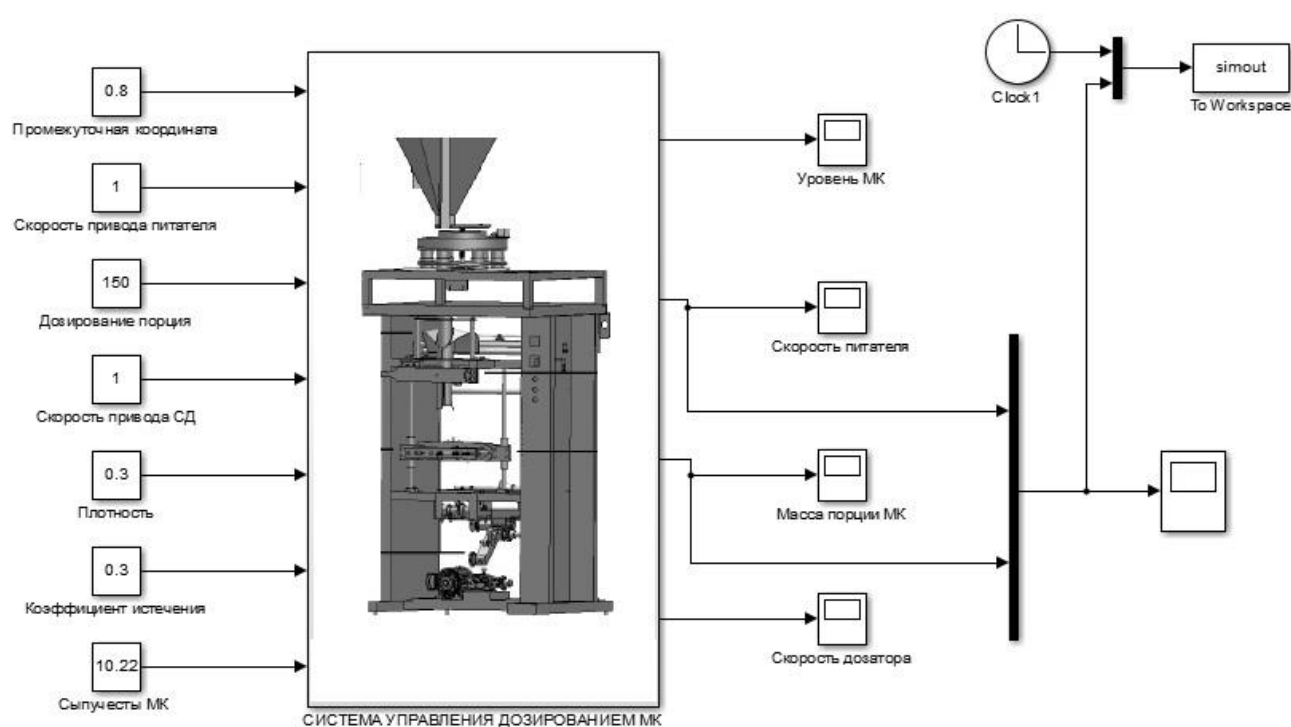


Рисунок 3.5. Имитационная модель системы управления дозированием молотого кофе разработанной в «Matlab - simulink».

Объем МК q_3 , засыпаемые в мерных стаканах СД на t –цикле дозирования, будут формироваться по законам распределения, с учетом изменения математического ожидания m_i , среднее квадратическое отклонение объема МК и промежуточной координаты в бункере дозатора СД, а также средний объем и дисперсия 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 МК.

Рассмотрение наличия внутренних возмущений, связанных с наличием стволовых режимов течения молотого кофе в бункере дозатора СД и внешних возмущений работы приводов требует введения блоков внесения случайных помех. В зависимости от закона распределения помехи в среде Matlab они имеют обозначения «Random number», «Uniform Random Number» [120].

Источник случайного сигнала с нормальным распределением «Random number», назначен для формирования случайного сигнала с нормальным распределением уровня сигнала со следующими параметрами управления сигнала [86]:

Mean - Среднее значение сигнала

Variance- Дисперсия (среднеквадратическое отклонение).

Initial seed – Начальное значение.

Источник «Uniform Random Number» используется для формирования случайного сигнала с равномерным распределением со следующими параметрами управления сигнала:

Minimum – Минимальный уровень сигнала.

Maximum – Максимальный уровень сигнала.

Initial seed – Начальное значение.

Вместо термина «система управления приводом» в процессе интерактивного взаимодействия со средой моделирования проектировщик начинает использовать термин «PID Controller», вместо термина «привод» используется представление произведения множителей «Transfer Fun» на языке передаточных функций. Выбор языков определяются опытом и предпочтениями пользователя CAD систем.

На рисунке 3.6 показана подсистема процесса истечения МК. В этой схеме определяется уровень молотого кофе при процессе дозирования.

Подсистема – процесса истечения МК в бункере: 1. Блок фиксированной задержки сигнала Transport Delay чтобы обеспечить задержку входного сигнала

на заданное время $q_1(t)$. 2. Интегратор для интегрирования входного сигнала величины промежуточной координаты (h – уровень кофе). 3. Усилители Gain выполняет умножение входного сигнала на постоянный коэффициент площади бункера СД. 4. Блок сумматор 5. Вычисление массы (объем) расхода q_1 и q_2 .

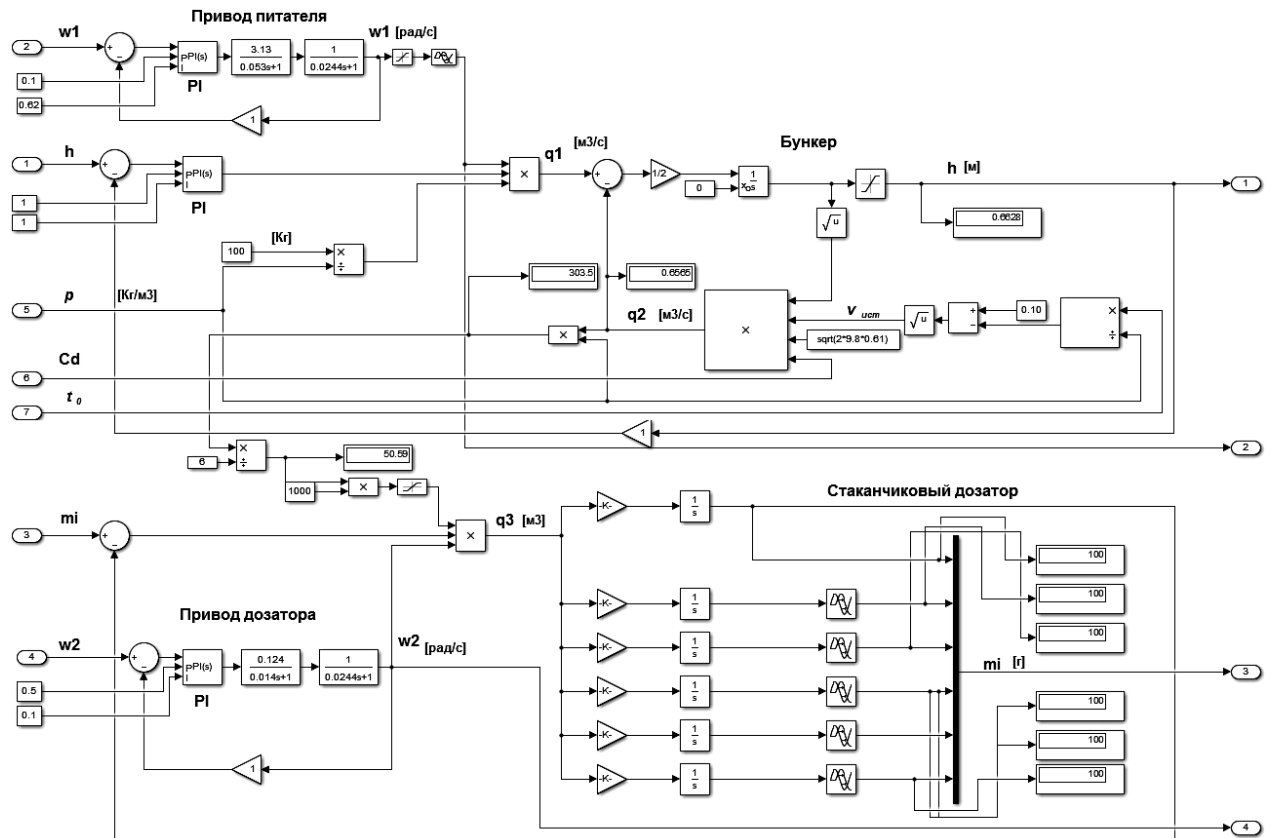


Рисунок 3.6. Структурная схема подсистемы модели процесса управления дозированием молотого кофе

3. 6. Постановка задачи моделирования и допущения, используемые при разработке моделей управления процессом ДМК

Процесс дозирования продуктов молотого кофе начинается с набора скорости продукта. При установлении скорости МК, идёт равномерный набор порций продукта. В конце начинается отключение устройства подачи (УПК), и увеличение массы продукта происходит за время отключения УПК и за счёт

количества находящегося в падении продукта МК. Т.к. время отключения неодинаково и количество продукта МК, находящегося в падении, точно определить невозможно возникает разброс объема дозы продукта МК. Поэтому для повышения точности дозирования желательно уменьшить время отключения и правильно подобрать скорость подающих устройств [62]. Изменение типа закона управления, изменения математического ожидания m_i , где учитываются физико-механических свойств МК, коэффициент истечения, контроль промежуточной координаты МК, режимов движения приводов устройства подачи и дозирования с учетом параметров настройки ПИ регуляторов являются основные шаги исследования функциональности модели [86, 118].

При разработке модели ТП продуктов МК на стадии дозирования рассматриваются задачи моделирования, которые выполняются по созданной методике в (п.2.6.1). В задачи исследования имитационной модели управления процессом ДМК входят [61]:

1. Экспериментальное исследование имитационной модели управления процессом ДМК в составе вертикальных фасовочных машин, где осуществляется стабилизацию промежуточной координаты МК с помощью контуров управления приводами УПК и УДК с законом регулирования ПИД – контроллера чтобы повысить однородность содержимого продуктов молотого кофе в упаковках за счет управления режимом движения.

2. Определение статических характеристик бункера по каналам «уровень продукта – скорость привода дозатора» и «уровень продукта – скорость привода загрузочного конвейера» и влияние на уровень продуктов молотого кофе действие случайных параметров возмущений как со стороны изменения скорости приводов питателя и объемного дозатора, так и со стороны изменения физико-механических свойств молотого кофе.

Для решения задачи, принятые следующие допущения: модель молотого кофе, состоит из абсолютно твердых частиц, разных фракции и имеет неправильную геометрическую форму, находящихся во взаимном контакте.

Для моделирования правильных дискретных частиц МК приняли математическую модель (формула 2.30) скорости истечения МК, где учитываются другие факторы возмущения как угол внешнего трение, коэффициент внутреннего трение и коэффициент сыпучести МК. Результаты моделирования соответствуют моделью частиц МК (п. 2.5).

В процессе движения частиц МК, плотность остается постоянной. В начале движения молотого кофе из отверстия бункера, часть опоры внутри бункера теряется, следствием чего является изменение давления внутри молотого кофе. Насыпная плотность вследствие разрыхления уменьшается, приближаясь к минимальному значению. В процессе истечения молотого кофе, может или расширяться, или сжиматься в зависимости от начальной плотности упаковки в соответствии с давлением, действующим на отдельные ее частицы. Если в процессе движения насыпная плотность молотого кофе остается постоянной, это равносильно не сжимаемости.

При нормальном виде истечения молотого кофе вдоль стенок бункера СД образует застойную зону. В этой зоне частицы неподвижны до тех пор, пока воронка образованная на поверхности молотого кофе, не достигнет самого нижнего поперечного сечения БСД.

Укрупненная блок-схема моделирующего алгоритма управления процессом дозированием показывается на рисунке 3.7. Данная блок-схема показывает алгоритм выполнения работы имитационного моделирования подсистемы модели процесса управления дозированием молотого кофе, где вводятся заданные значения входных параметров по законам распределения помехи как случайный сигнал с нормальным распределением и сигнал с равномерным распределением. Используемые коэффициенты передаточных функции для приводов питателя и объемного дозатора, а также коэффициенты настройки ПИ контроллера, рассматривается в следующей главе.

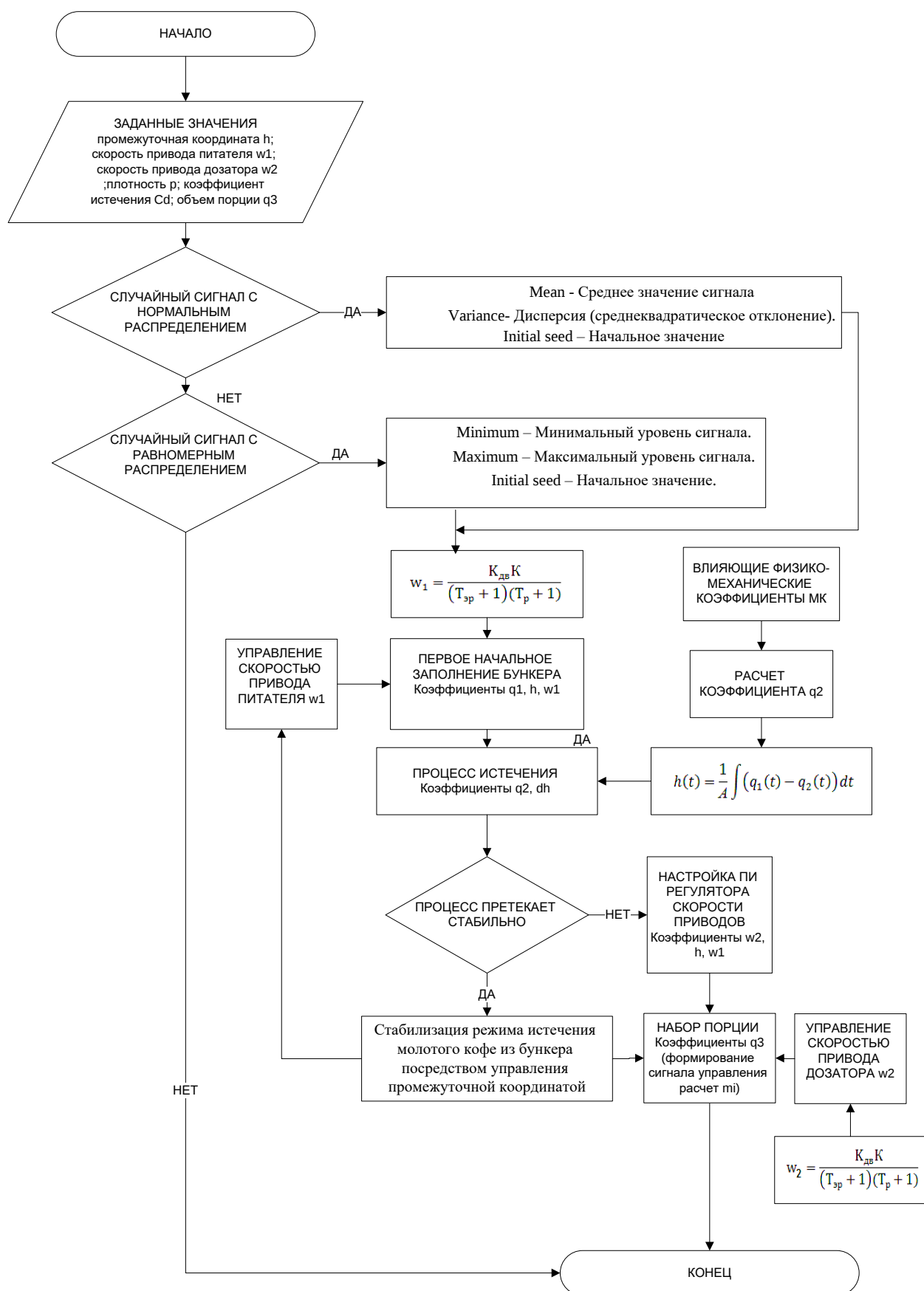


Рисунок 3.7. Блок-схема моделирующего алгоритма имитационной модели управления процессом дозированием МК

Для решения этой задачи предложено включить контур управления уровнем МК для компенсации данных возмущений в состав системы автоматизации производства кофе на стадии дозирования, а также правильных параметров конструкции цилиндрикоконической бункера описанные в п. 2.4.

Результаты имитационного моделирования процесса управления дозированием молотого кофе показали, что среди факторов, перечисленных в постановке задачи имитационного моделирования, можно выделить несколько факторов, вариация которых однозначно сказывается на производительности и точности процесса дозирования молотого кофе. К ним относятся: закон формирования управляющего воздействия, компенсирующего изменение физико-механических свойств молотого кофе, случайные возмущения как со стороны изменения скорости приводов питателя и объемного дозатора СД.

Такие факторы позволяют исследовать влияние на уровень молотого кофе в бункере действие внешних возмущений.

Имитационные эксперименты с различными законами распределения объема порции молотого кофе, загружаемых в мерных стаканах дозатора СД, продемонстрировали слабое расхождение получаемых результатов от экспериментов с нормальным законом распределения загружаемых объема продукта при таких же значениях математического ожидания и дисперсии этих порции МК. При применении ПИ регуляторов позволит обеспечить более точную стабилизацию уровня молотого кофе, чем при использовании позиционного закона управления в условиях колебаний свойств молотого кофе.

Результаты имитационного моделирования процесса управления дозированием молотого кофе полностью подтвердили правильность рассуждений аналитических данных в главе 2, критерий управления (п.3.1) и результат анализа проведенных в (п. 3.4). Использование данных имитационного моделирования управления процессом ДМК будет подробно рассмотрено в следующей главе и для разработки программного комплекса, где будет применяться разработанной модели для создания мнемосхемы и разработки программного аппаратного комплекса системы (SCADA) ДМК.

3. 7. Выводы по третьей главы

1. 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 БСД посредством управления промежуточной координатой.

2. Сложности настройки приводят к функциональным ограничениям процесса объемного дозирования, обусловленными уменьшением возможностей стабильной работы дозатора в требуемом диапазоне параметров ДМК. Таким образом, применение методологии управления приводами для процесса дозирования при использовании простых методов контроля и логического управления уровнем молотого кофе невозможно контролировать образование застойных зон в бункере дозатора и повысить однородность содержимого молотого кофе в упаковках за счет управления режимом движения.

3. Нестационарный характер возмущений технологических факторов процесса производства молотого кофе осложняет управление процессом дозирования в целом. Обеспечение заданных условий истечения молотого кофе реализуется посредством управления приводами параметрами электропривода системы объемного дозирования молотого кофе. Специфичность электромеханических параметров электропривода процесса объемного дозирования проявляется в том, что эти параметры зависят от физико-механических характеристик дозируемого молотого кофе.

4. 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 действие внешних возмущений. В качестве критерия управления выбирается заданная производительность

технологической линии с наложенными на нее ограничениями на колебания объемная масса молотого кофе в упаковке.

5. К разработанной модели управления процессом дозирования МК, предложена методика определения параметров модели при управлении уровнем молотого кофе в бункере дозатора, которая позволяет 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 молотого кофе из бункера объемного дозатора.

6. Представлен алгоритм работы модуля контроля и регулирования величины уровня молотого кофе в процессе дозирования. Установлено, что достаточно сложно точно представить отображение скорости и вид истечения молотого кофе с помощью методов математического моделирования. Предлагается решить данную проблему с применением метода дискретных элементов (SCADA) и разработки программного комплекса, где будет применяться разработанной модели.

7. Результаты имитационных экспериментов автором проведенные в матлабе (Matlab) показали, что при применении ПИ регуляторов позволило обеспечить более точную стабилизацию уровня молотого кофе, чем при использовании позиционного закона управления в условиях колебаний свойств молотого кофе.

ГЛАВА 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И АПРОБАЦИЯ МАКЕТА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЪЕМНОГО ДОЗИРОВАНИЯ МОЛОТОГО КОФЕ

4.1. Анализ результатов имитационного моделирования при управлении процессом дозирования МК. Синтез дозатора и оптимальных характеристик закона их заполнения.

Управление формированием видом истечением частичных масс МК.

Предположение в главе 2 (п. 2.2) и допущение в главе 3 (п. 3.6), о том, что объем МК в процессе истечения q_2 и объемные порции дозирования q_3 являются случайными величинами, распределенными по нормальному закону, было доказано влияние на уровень МК h (рисунок 4.1) при заданной промежуточной координаты ($h_{\text{зад}} = 0.8$ м) в бункере стаканчикового дозатора с высотой (1.20 м) действие внешних возмущений из результатов моделирования разработанной модели управления процессом ДМК.

Как указано в (см разделе 3.1.) случайная погрешность объема порции МК определяется в основном колебаниями высоты продукта в мерной стакане, поэтому можно повысить точность дозирования молотого кофе увеличением высоты мерной стакане при уменьшении площади поперечного сечения или диаметра стакана. Показатель погрешности доз пищевого продукта для стаканчиковых дозаторов зависит от формы мерной стакане. Масса дозы гранулированных частиц МК при отмеривании ее в мерных стакане по форме стакане складывается из объема стакане $V_{\text{мст}}$, помноженного на плотность продукта ρ , зависящие от изменения температуры $t^\circ \text{C}$ и влажности продукта и воздуха в цехе. Следует отметить, что на точность дозирования влияет также

количество мерных стаканов в дозаторе, участвующих в процессе, по той причине, что дозы порции МК в них неравноценны и постепенно происходит накопление погрешностей доз порции.

Концепция построения разработанной имитационной модели управления процессом ДМК в главе 3 (п.3.5) заключается в задаче оценки максимального производительности и оценки точности дозирования при действии случайных величин факторов возмущении и режимов движения приводов.

Также найти оптимальные настройки ПИ контроллера для приводов устройств питателя и стаканчикового дозатора, чтобы стабилизировать процесс и качества перерегулирования.

Одной из задач данной диссертационной работы является получение максимального качества дозирования частиц МК при наибольшей производительности приготовления.

В конце разработать специальный макет программно-аппаратного комплекса (ПАК) виртуального датчика и блока оптимизатора, построенного на основе искусственной нейронной сети (ИНС) имитационной модели управления процессом ДМК.

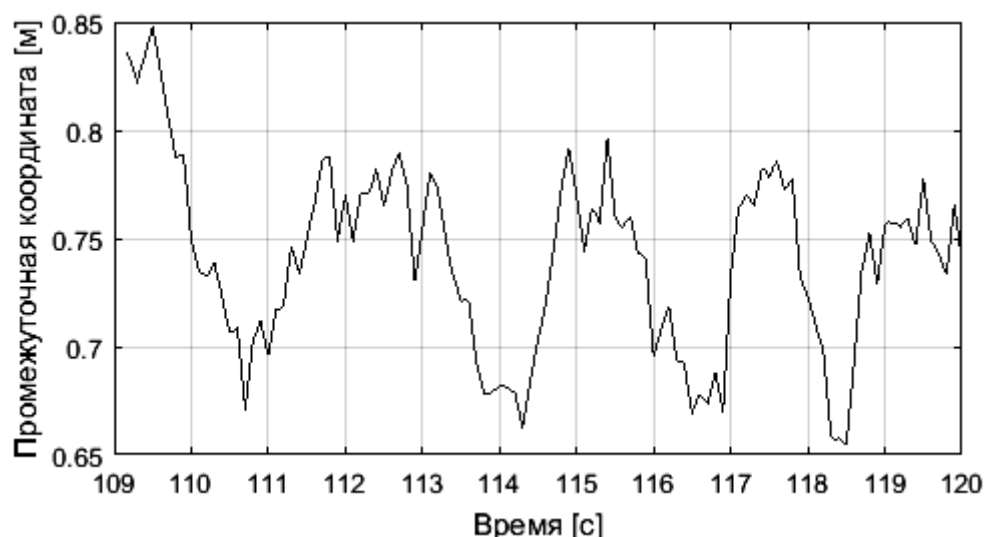


Рисунок 4.1. Переходный процесс промежуточной координаты – уровня молотого кофе в бункере стаканчикового дозатора при действии внешних возмущений по закону нормального распределения помехи

Запаздывание управляющих воздействия t_i по каждому каналу стаканов объемного дозатора определяется циклов дозирования, при которых мерный стакан дозатора данного канала опустошится k раз плюс единица, когда продукт МК проходит мерные стаканы (п. 3.5 см. 3.29). Рассматривается фасовочно-упаковочный автомат V-300, который имеет стаканчиковый дозатор MF-DT 5000 (6 мерных стаканов) и продукт натурального растворимого сублимированного кофе с добавлением натурального жаренного молотого кофе. Условия для границ массы дозы МК выбираются на основании действующего ГОСТ Р 52088-2003[48]. В составляющей метаматематического ожидания, учитывающей изменение физико-механических свойств МК $X_{\phi_m}(t - t_i)$, определяются среднее значение Me и коэффициент вариации De^2 плотности МК ρ , коэффициента истечения МК Cd , коэффициента сыпучести МК τ_0 .

$$\rho \rightarrow N[Me; De]; Cd \rightarrow N[Me; De]; \tau_0 \rightarrow N[Me; De] \quad (4.1)$$

Тогда из формулы 4.1, определение среднего значения и коэффициента вариации составляющей метаматематического ожидания, учитывающей изменение физико-механических свойств МК из результатов измерений, которые были определены в главе 2 (п. 2.1-2.3) будет.

$$X_{\phi_m} \rightarrow N \left[Me_{\rho} + Me_{Cd} + Me_{\tau_0}; \sqrt{De_{\rho}^2 + De_{Cd}^2 + De_{\tau_0}^2} \right] \quad (4.2)$$

Блок Random Number описывается аналитическим выражением:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}De} e^{-\frac{(Me-M)^2}{2De^2}} \quad (4.3)$$

где M – математическое ожидание; De^2 – дисперсия; De – стандартное отклонение.

На рисунке 4.2 параметры случайных величин изученных физико-механических свойств молотого кофе, используемые как параметры возмущение на режим работы процесса.

Рассмотренные следующие величины скорости для электроприводов питателя и стаканчикового дозатора: Низкая угловая скорость – 5.25;

нормальная угловая скорость – 57.66; средняя угловая скорость – 110.37; высокая угловая скорость – 210.01; [рад/с].

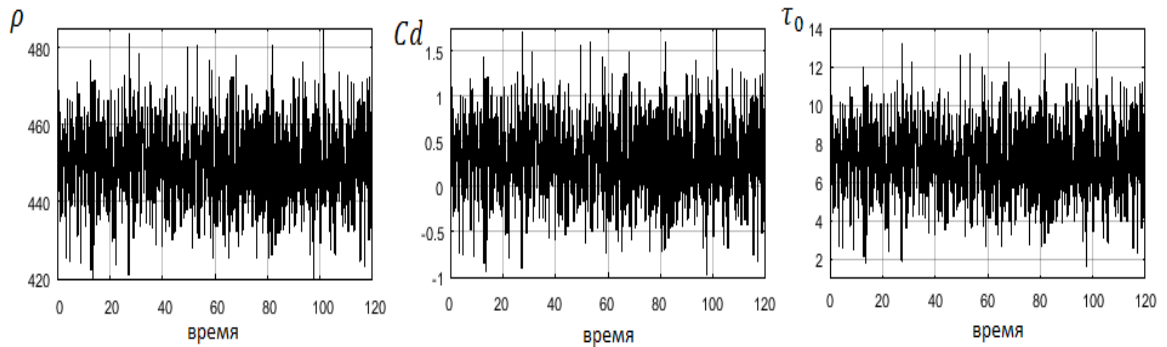


Рисунок 4.2. Случайные коэффициенты физико-механических свойств МК

Таким образом, случайные изменения масс формируемых частичных доз порции МК могут содержать не только собственно случайную составляющую, но и регулярную случайную составляющую, обусловленную, например, изменениями физико-механических свойств дозируемого вида молотого кофе или сыпучего материала в бункере объемного дозатора и изменениями скоростей приводов устройств подачи и дозирования.

Параметры коэффициентов передаточной функции электромеханической составляющей и механической составляющей двигателей $D_{i(s)}$ приводов питателя и дозатора были получены из выбранных данных приводов и тиристорного преобразователя частоты переменного тока по управляющему воздействию которые рассматриваются в работе [137, 110].

$$W_{эд(s)} = \frac{3.13}{(0.053s + 1)} \quad W_{мех(s)} = \frac{1}{(0.024s + 1)} \quad (4.4)$$

Среднее число оборотов диска СД ($N = 5$ об/мин), чтобы определить передаточную функцию стаканчикового дозатора находим коэффициент k и постоянная времени T . Средняя производительность стаканчикового дозатора выбрали (45 упак/мин) но есть вертикальные фасовочные машины как ДА-2РС (Россия, Воронеж), Ганзелла (Бельгия), ПО "РУСТ" (Москва), которые имеют производительность от 60 упак/мин при оптимальной массе дозы в 100 г [93].

$$k = \frac{\text{производительность } Q, \text{кг/с}}{\text{число оборотов } N \text{ в секунд}} = ; Q = k * N * (1 - e^{-\frac{1}{T}}) \quad (4.5)$$

Тогда передаточная функция стаканчикового дозатора будет.

$$W_{сд(s)} = \frac{0.19}{(0.054s + 1)} \quad (4.6)$$

Датчики скоростей приводов и уровня МК представлены в виде пропорциональных звеньев $W_{дат(s)} = 1$. Передаточная функция устройства питателя (ленточный конвейер типа 1Л100ЛК) описана в формуле 4.7.

$$W_{кон(s)} = \frac{1}{(0.031s^2 + 0.055s + 1)} \quad (4.7)$$

По виду переходных процессов полученных результатов величины промежуточной координаты (см. рисунок 4.1) в бункере СД, можно сделать вывод о том, что переходный процесс является колебательным, значительной статической ошибкой выходной величины от задания в установившемся режиме.

Результаты моделирования показывают, что при больших изменениях в процессе колебании уровня молотого кофе в бункере то непредсказуемо изменяются точность доз МК, и даже с выходом за пределы, указанные в технической характеристике стаканчикового дозатора. Как пример на рисунке 4.3., можно наблюдать колебания объемных масс порции МК в мерных стаканах во время дозирования при заданной объема порции массы ($m_i = 100$ грамм) что влияет и на производительность стаканчикового дозатора при изменении режимы движения электроприводов УПК и УДК и свойств МК. Существенная абсолютная ошибка объема порции дозирования МК 16.76%, которая категорически не допустима согласно технологическим требованиям при производстве молотого кофе. Чтобы получить требуемую точность дозирования МК, необходимо в системе управления приводом питателя и объемного дозатора использовать алгоритмы коррекции ошибки дозирования.

При стабилизации промежуточной координаты в бункере СД и использовании рекомендованной значения формы мерного стакана (п. 3.1)

помогло значительно уменьшить ошибки точности доз МК на рисунке 4.4. Используемый коэффициент формы стакана составил величины площади мерных стаканов (0.09 м^2).

Такое действие помогает устранить и избежать от процесса сводообразования и сегрегации пищевых продуктов при истечении. В результате точности порции МК в мерных стаканах составили 0.17% и погрешность дозирования 0.55г.

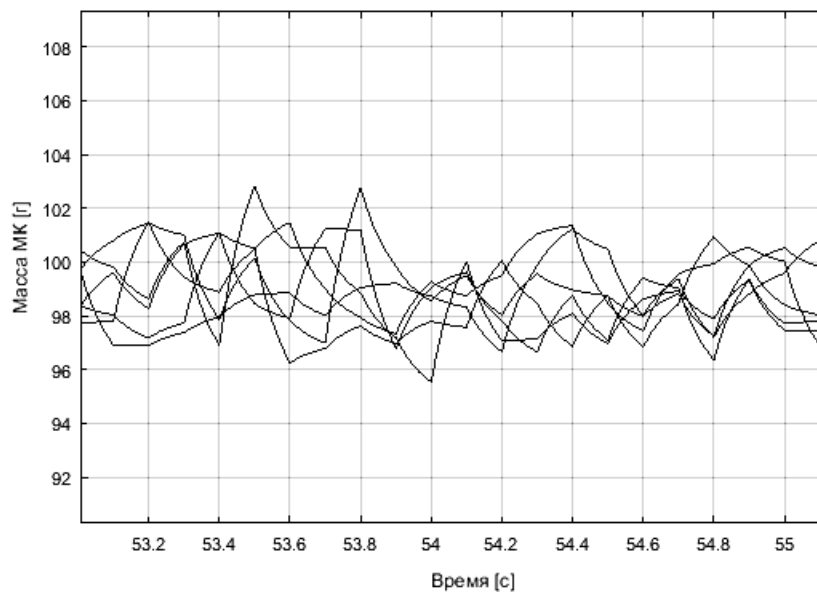


Рисунок 4.3. Колебания объемных масс порции МК при заданной порции 100 грамм в мерных стаканах дозатора при действии внешних возмущений по закону нормального распределения помехи

Входной параметр производительность при моделировании системы управления процессом ДМК подан сигнал задания $Q_{\text{зад}} = 60$ [упак/мин] по 100 грамм порция объема доз МК. (0.6 кг/мин).

Установлено заданное значение промежуточной координаты МК в бункере в пределах величин больше половины размера высоты бункера СД размером 1.20 м, чтобы осуществить равномерный процесс истечения пищевого продукта и снизить влияние на производительность объемного стаканчикового

дозатора фасовочно-упаковочного автомата (ФУА) ($h = 0.7$ м). Для этого устанавливается скорость вращения привода питателя 185 рад/с (1163 об/мин).

Начальная угловая скорость вращения привода дозатора 332 об/мин (48 рад/с). Средняя скорость диска стаканчикового дозатора 7 об/мин. Таким образом, для производительности 60 упак/мин, скорость вращения привода увеличивается до 52 рад/с, скорость вращения диска стаканчикового дозатора 9 об/мин.

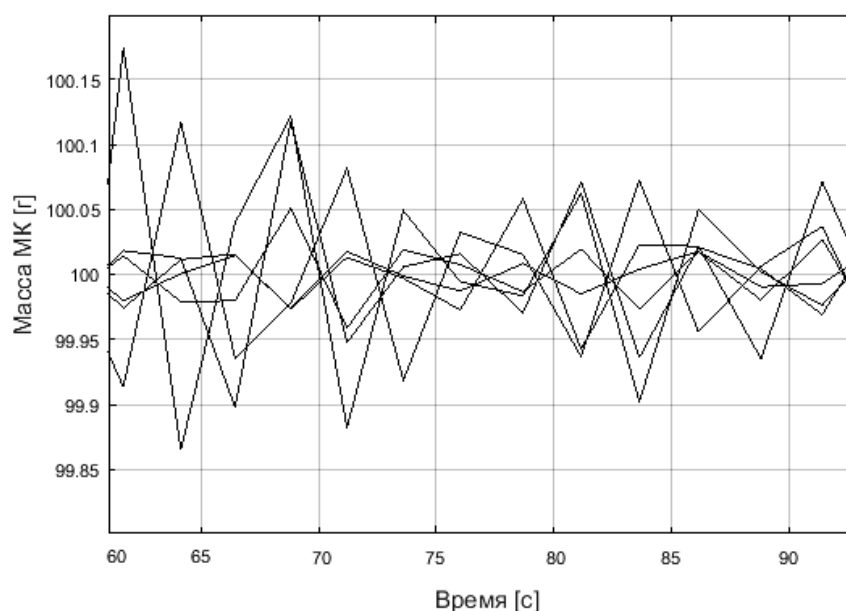


Рисунок 4.4. Колебания объемных масс порции МК при заданной порции 100 грамм в мерных стаканах дозатора при стабилизации промежуточной координаты и применении PI

После выхода на установившуюся скорость вращения привода стаканчикового дозатора, производительность не постоянная и ошибка составляет 7% на рисунке 4.5.

При использовании ПИ-регулятора параметров системы приводов составили: перерегулирование 2.1%; время переходного процесса 0.13с, что соответствует настройке регулятора на технический оптимум.

Параметры настройки ПИ – контроллер для привода питателя установлены $K_p = 0.01$, $K_i = 0.1$, а для привода стаканчикового дозатора $K_p = 1.8$, $K_i = 0.0021$.

Скорость истечения МК при стабилизации промежуточной координаты в бункере в пределах величин больше половины размера высоты бункера СД увеличивается и подтверждает полученным результатам о скорости истечении в главе 2 (п. 2.3).

На рисунке 4.6., можно наблюдать стабилизации производительности при использовании ПИ-законов регулирования приводов и действии внешних возмущений по закону нормального распределения помехи. Производительность увеличивается на 25%. Максимальная производительность при использовании законов регулирования ПИ контроля и изменение параметров возмущения рассматриваются в таблице 4.1.

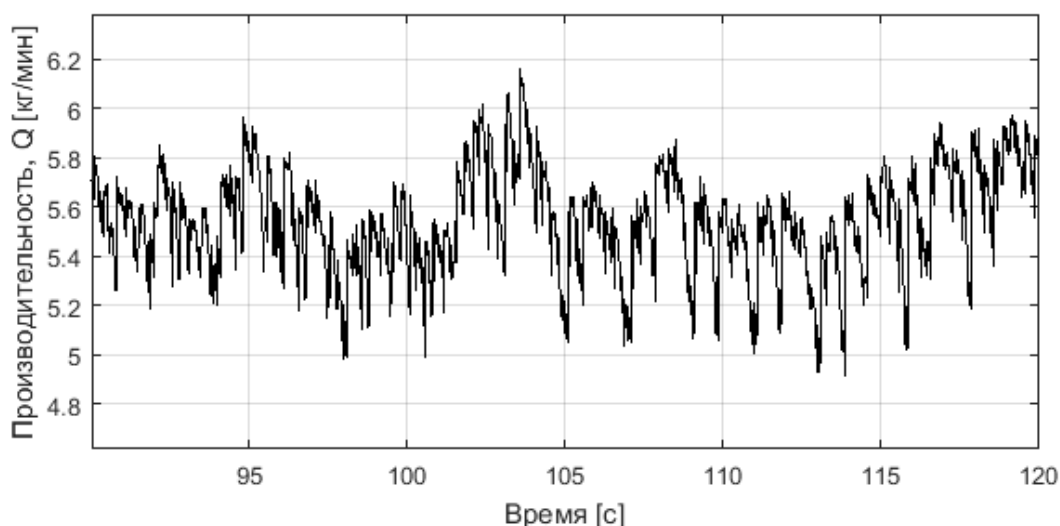


Рисунок 4.5. Переходный процесс производительности при действии внешних возмущений по закону нормального распределения помехи

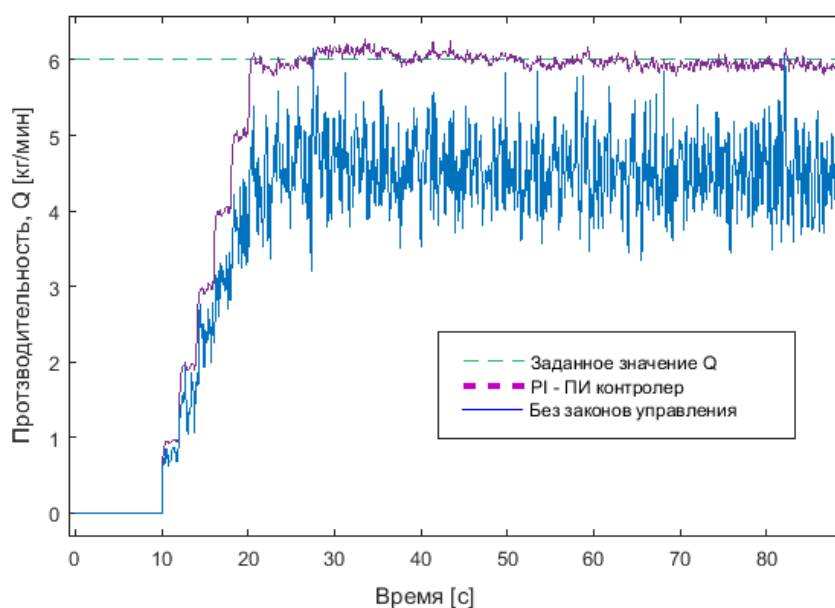


Рисунок 4.6. Стабилизация производительности при действии внешних возмущений по закону нормального распределения помехи с использованием ПИ контроля

При изменении заданных параметров управления промежуточной координаты и скорости привода дозатора с использованием один набор коэффициентов ПИ контроллера для всех режимов движений приводов не обеспечивает качества переходных процессов, как показывается на рисунке 4.7.

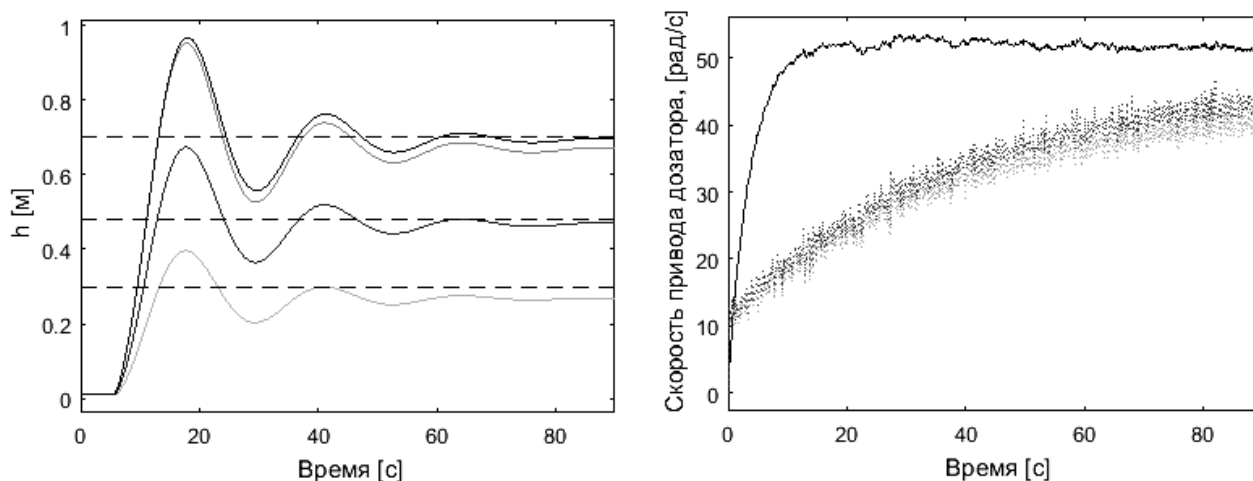


Рисунок 4.7. Переходный процесс с применением ПИ-контроллера, а. промежуточная координата, б. скорость привода дозатора

Таблица 4.1.

№ п/п	Вид объема частиц кофе	v , м	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	$\rho = \pm 300$ $Cd = 0.1$ $\tau_0 = \pm 7.16$	0.08	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

Согласно результатам моделирования, для поддержания заданного оптимального значения промежуточной координаты и постоянной производительности при изменении параметров возмущении в этом случае предлагается осуществлять управление уровню МК в бункере как промежуточная координата и последовательно скоростей приводов устройства подачи кофе (УПК) и дозирования кофе (УДК) путем перенастройками коэффициентов ПИ-контроллера.

Смена задания по промежуточной координате, производительностью, скорости дозатора, объем порции в стаканах и загрузка другого вида пищевого материала (кофе) требует нахождения оптимальные настройки коэффициентов ПИ-контроллера (PI).

При постоянных коэффициентах ПИ-регулятора для приводов зачастую приводит к снижению качества регулирования, что приводит к росту

энергозатрат на ведение технологического процесса ДМК при изменении условий управления.

Таким образом, необходимо определить оптимальные настройки коэффициентов ПИ контроллеров приводов для адаптации в целом, к трудоемкостям данного процесса во время работы при изменениях свойств МК, смены задания управления и режимов движения приводов устройств путем построения адаптивных систем управления технологическим процессом ДМК, автоматически подбирающих коэффициенты (ПИ-контроллера), позволяющие при любых нуждающихся условиях управления осуществить равномерный процесс истечения МК и хорошие качества переходных процессов.

4.2. Определение оптимальных параметров настройки системы управления процессом дозирования МК.

С точки зрения любого предприятия, занимающиеся производства продуктов молотого, сублимированного кофе в процессе дозирования, главным критериям их работы является, прибыль от проведения технологического процесса производства нуждающегося вида кофе. Сформулировать свертки критериев точности и производительности для прибыли сложно. Работа заключается в получении оптимальных параметров настройки скорости стаканчикового дозатора и промежуточной координаты в бункере для эффективного работы дозатора и равномерного процесса истечения и расфасовки данного вида продукта кофе. Параметры, которые помогают осуществлять хорошие качества продукта и прибыльно для предприятий.

Фактически, для каждого состояния в процессе ДМК необходимо подбирать свои значения коэффициентов регулятора для управления УПК и УДК. В производстве молотого кофе, использовать всего один набор таких коэффициентов для всех режимов движений приводов, без них перенастройки полностью не обеспечивает качества дозирования пищевых продуктов ввиду трудоемкости данного процесса. Для решения указанной проблемы,

необходимо определить оптимальные коэффициенты для ПИ контроллера, поскольку первоначально степень нелинейности процесса ДМК достаточно тяжело оценить, и необходимости вносить изменения уже в процессе работы, во время дозирования. Для этого была разработана в главе 3 (п. 3.4) структура нейронной сети, типа многослойного персептрона с одним скрытым слоем - ПИД контроллером, где будут настроены коэффициенты именно для ПИ контроллера, так как разработанная модель обладает нелинейными свойствами и способностью к обучению, что придает адаптивные свойства нейросетевых системы управления процессом ДМК [109]. Нейросетевой оптимизатор (НСО) параметров ПИ-контроллера приводов в процессе ДМК (рисунок 4.8) была реализован в среде Matlab Simulink с помощью команда `nntool`.

Нейросетевой оптимизатор также можно создать с помощью командой строке (`newff`) для разработки НСО представляющий собой алгоритм обратного распространения ошибки (`backpropagation`) со следующим кодом.

$$\text{red} = \text{newff}(\text{minmax}(\text{rpi}), [\text{s1} \text{s2} \text{s3}], \dots \{ \text{'purelin'}, \text{'tansig'}, \text{'purelin'} \}); \quad (4.8)$$

где, $s1$ – количество нейронов входного слоя, $s2$ – количество нейронов скрытого слоя и $s3$ – выходной слой, `red` – название нейросетевого оптимизатора, `rpi` – файл входных и выходных данных переменных параметров НС.

При работе с заполнением, подачам, истечением и дозированием материалом в бункере СД для управления УПК и УДК требуется, два набора коэффициентов PI для каждого привода со своими оптимальными коэффициентами, чтобы не привело к снижению качественных показателей переходной характеристики показателей уровня МК в бункере и производительности ФУА со стаканчиковым дозатором. В связи с этим, создан нейросетевой оптимизатор в виде двух идентичных нейронных сетей, каждая из которых отвечает за управление коэффициентами регулятора разных приводов для своего типа процесса при заполнении и дозирования материала.

Входной слой (Input) представляет собой входные параметры управления приводов УПК и УДК соответственно. В выходном слое (Output layer) два нейрона отвечают за коэффициенты PI. Экспериментально было установлено, что в данном случае 7 нейронов в скрытом слое является оптимальным числом. В скрытом слое была использована функция активации гиперболический тангенс, в выходном слое (Output) – линейная функция. Внутри этих функции реализованы алгоритм оперативного обучения, представляющий собой алгоритм обратного распространения ошибки [59].

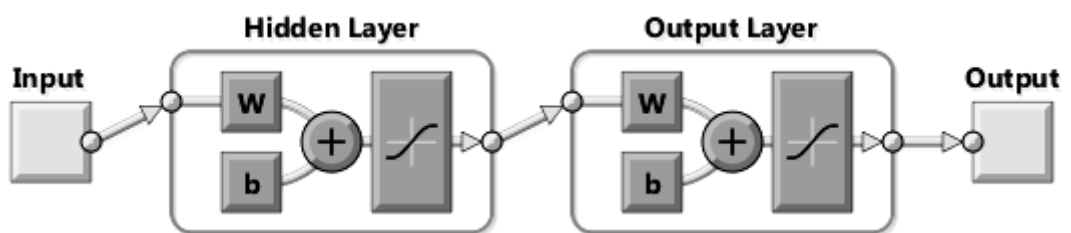


Рисунок 4.8. Разработанный нейросетевой оптимизатор параметров
ПИ-контроллера для приводов в процессе ДМК

С помощью командойстройки в рабочем среде Matlab (nnstart) обучалась нейронная сеть и создан блок оптимизатор на рисунке 4.9, чтобы добавить в контуре разработанной имитационной модели процесса ДМК.

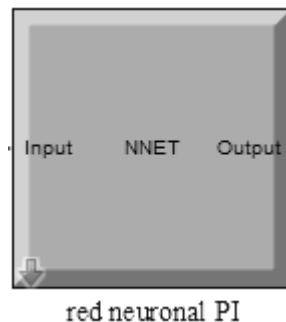


Рисунок 4.9. Блок нейросетевого оптимизатора ПИ контроллера

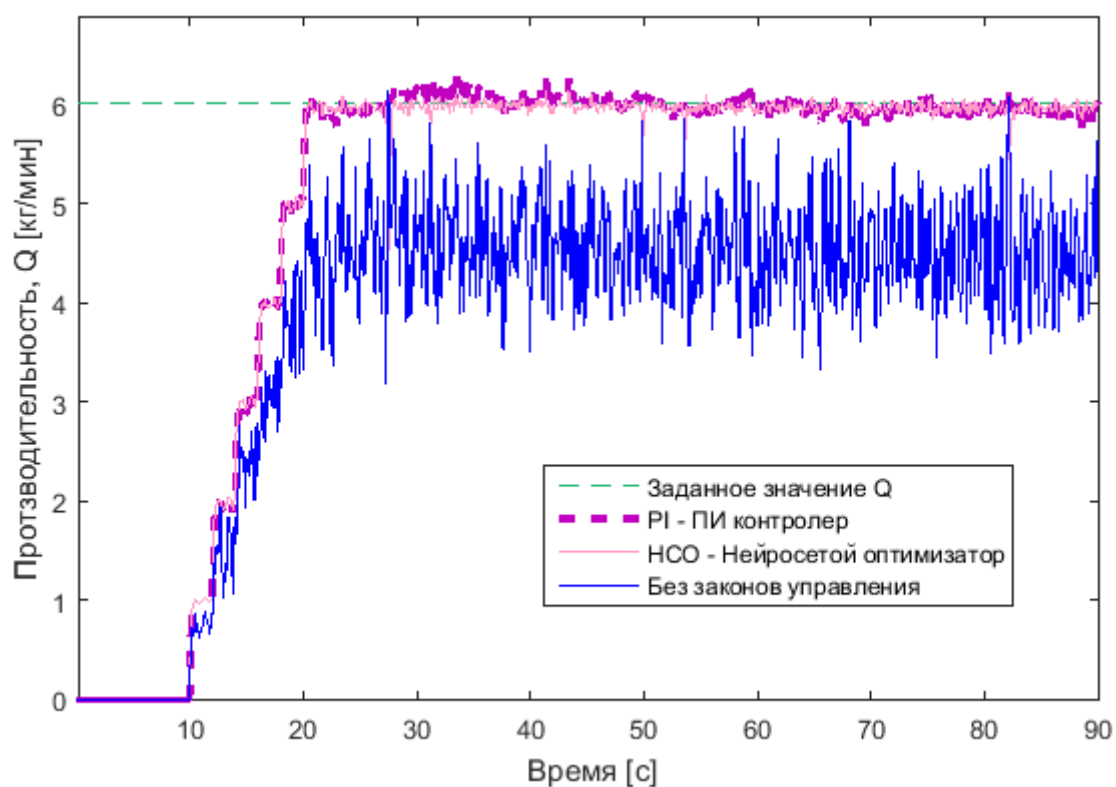


Рисунок 4.10. Результаты для графика переходного процесса производительности с использованием НСО

Рисунок 4.11.

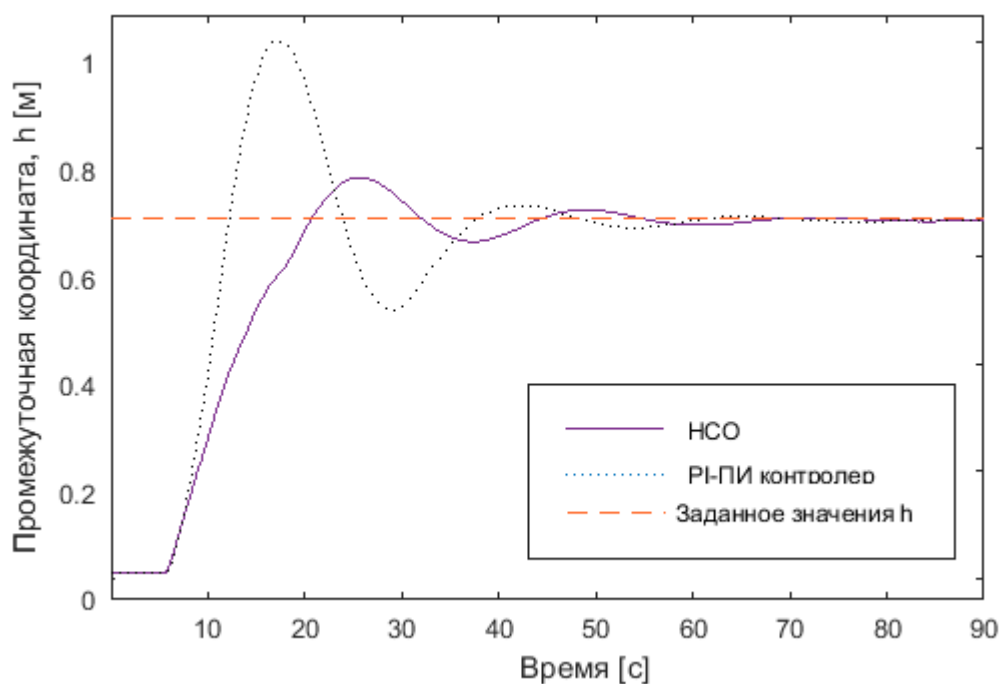


Рисунок 4.12. Переходный процесс промежуточной координаты с применением нейросетевого оптимизатора

Оптимальные коэффициенты ПИ контроллера 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 МК в бункере СД, регулирования скорости приводов питателя и дозатора – переходе в энергосберегающий режим, устройство УПК определяет загрузку МК в соответствии с режимом работы стаканчикового дозатора и формирует необходимую, экономически выгодную, уставку по скорости в САР процесса ДМК. Система автоматического регулирования переводит частоту вращения приводного электродвигателя на заданную скорость УПК и УДК без опасных динамических нагрузок на устройство питателя и стаканчикового дозатора. Тем не менее, держать стабильность величины промежуточной координаты в бункере дозатора позволяет осуществить равномерное истечение продукта, избегать от сводообразования и сегрегации и устранить ошибки точности дозирования.

Предлагаемые усовершенствования, внесенные в схему реализации ПИ-нейросетевого оптимизатора, позволили обеспечить стабилизация параметров производительности (таблице 4.2.) и промежуточной координаты при действии возмущающих факторов и смене задания управляющих воздействия за счет авто-настройки коэффициентов ПИ контроллера для приводов устройств питателя и стаканчикового дозатора путем обеспечения требуемого качества переходного процесса в процессе ДМК.

С помощью имитационного моделирования осуществляется предварительная проверка точности порции в процессе объемного дозирования для различных видов и физико-механических свойств МК с построением количественных зависимостей с учетом параметров электротехнического комплекса и свойств дозируемых частиц МК.

Таблица 4.2.

Вид порция частиц кофе		Производительность, кг/мин с учетом алгоритмов компенсации ПИ контроллера	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%

Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать вывод о том, что созданная нейросетевого оптимизатора НСО для ПИ контроллера позволяет сократить время и перерегулирование, а также можно сократить электроэнергию при сокращении дополнительных устройств контроля процесса сводооброзования, и вполне может стать прототипом универсального промышленного аппарата настройки параметров ПИ контроллера в процессе дозирования сыпучих материалов и пищевых продуктов.

4.3. Оценка качества имитационной модели ДМК

Возможно, лишь оценивать стабильность конкретного переходного процесса, такие как промежуточная координата, в случае обнаружения неустойчивости, возвращать регулятору коэффициенты, которые использовались в рамках последнего устойчивого переходного процесса.

Так как коэффициенты ПИ контроллера являются функциями времени и изменяются даже в течение конкретного переходного процесса ДМК, оценка устойчивости подобной системы классическими математическими методами является весьма затруднительной.

Согласно подходами, описанными Андерсеном [183] и Неслером [184]. Система считалась неустойчивой, если график промежуточной координаты более трех раз пересекал задание, и каждый раз амплитуда колебаний возрастала или достигла более 30% разницы между значением промежуточной координаты и задания в любой момент времени после первого пересечения задания текущим заданием и предыдущим. При выполнении неустойчивости системы, нейросетевой оптимизатор ПИ контроллера возвращается к первоначальному значению последнего устойчивого переходного процесса. В течение всех опытов система управления процессом дозирования оставалась устойчивой с точки зрения выбранных критериев производительности.

4.4. Разработка экспериментального макета программно-аппаратного комплекса управления процессом ДМК.

При создании автоматизированной системы управления технологическим процессом объемного дозирования молотого кофе возникают два аспекта проблемы, один из которых связана с созданием автоматизированной системы управления технологическим процессом дозирования связующего в физико-механические свойства частиц при производстве молотого кофе, а другой с созданием АСУ подачи и дозирования молотого кофе [19, 92].

В области систем управления, электромеханики и проектирования систем «технологический объект-система управления» проблема перехода от логической структуры задач моделирования к стилевым особенностям, связанным с применением систем автоматизированного проектирования и имитационного моделирования, стоит особенно остро при трансформации

представлений связей между моделями программно-технических средств, обусловленных композиционными отношениями [128].

Наличие композиционных отношений требует многократного перекодирования и отображения элементов одного множества координат для описания процессов дозирования молотого кофе в элементы множества для описания системы управления и далее в элементы множества для представления процесса дозирования молотого кофе, дозатора и системы управления в CAD/CAE системе. Не вдаваясь в суть операций отображения и их свойств определим то, что сами пространства являются нечетко определенными на начальных стадиях проектирования. Это приводит к возникновению технических и семантических ошибок при изменении элементного базиса для построения системы управления [17, 60, 25].

В свою очередь возможны когнитивные искажения сущности задачи проектирования и подмена данной задачи другой. При этом нарушаются определенные нормативными документами требования к показателям удобства применения и корректности CAD/CAE систем, отражающим представление программных документов и программ в виде, способствующем пониманию логики функционирования программы в целом и частном.

Показатели корректности определяют однозначное, непротиворечивое описание и использование тождественных объектов, функций, терминов, определений, идентификаторов и т.д. в различных частях документов и программных модулях при проектировании. Показатели удобства применения CAD/CAE систем отражают представление документов в виде, способствующем пониманию логики функционирования совокупности «питатель-система управления-дозатор».

Экспериментальный макет программно-аппаратного комплекса (ПАК) системы управления процессом дозирования молотого кофе, разработан с помощью среды разработки приложений измерения, тестирования и управления, реализующей концепции потока данных и графического программирования LabVIEW [74].

При разработке программно-аппаратного комплекса системы управления процессом дозирования молотого кофе использовались разные инструменты для концепции потока данных и графического программирования, которые делятся на две части:

Блок-диаграмма (Block Diagram), описывает логику работы приложений системы управления процессом дозирования.

Лицевой панель (Front Panel), описывает внешний интерфейс компьютерного зрения системы управления процессом дозирования молотого кофе. Лицевая панель компьютерного зрения системы управления процессом ДМК содержит средства ввода-вывода: кнопки, переключатели, светодиоды, верньеры, шкалы, информационные табло и т.п. Они используются человеком для управления виртуальными разными приборами рассмотренные при анализе в предыдущей главе.

Блочная диаграмма разработанной ПАК содержит функциональные узлы, являющиеся источниками, приемниками и средствами обработки данных технологического процесса ДМК. Также компонентами блочной диаграммы являются терминалы («задние контакты» объектов лицевой панели) и управляющие структуры (являющиеся аналогами таких элементов текстовых языков программирования, как условный оператор «IF», операторы цикла «for» и «while»). Функциональные узлы и терминалы объединены в единую схему линиями связей.

Разработанные программные модули ПАК называются «Virtual Instruments», виртуальные Инструменты или VI. Они сохраняются в файлах с расширением *.vi.

Разработанный программный аппаратный комплекс для управления процессом дозирования, включает разные задачи контроля технологического процесса объемного дозирования пищевых продуктов, предназначенный для лабораторных исследований контроля показателей качества пищевых продуктов и сыпучих материалов, такие как молотый кофе, управление

процессом дозирования с помощью алгоритмы ПИ контроллера и измерение количество величины объемных расходов пищевого продукта из бункера СД.

Задачи разработки ПАК были разделены на две части, чтобы проверить функциональности программы компьютерного зрения.

Первая задача заключалась в решении условия заполнения и истечения молотого кофе из бункера объемного дозатора, сформирована соответствующая программная процедура аппаратного комплекса на рисунке 4.13, где используется конструкция управления цикла (while loop) для измерения количества величины объемных расходов сыпучего материала и для определения условий управления промежуточной координаты в бункере СД. Внутри данной структуры размещаются терминал счетчика итераций цикла (iteration terminal) и терминал условия выхода из цикла (conditional terminal) для управления подачам и истечениям расхода сыпучих продуктов МК. Код программы, размещенный в структуре, выполняется до подачи на терминал условия логической переменной истина (true) в структуре [135]. Лицевая панель задачи процесса истечения и заполнения частиц молотого кофе показывается на рисунке 4.14., где можно наблюдать динамики процесса заполнения и истечение пищевых продуктов.

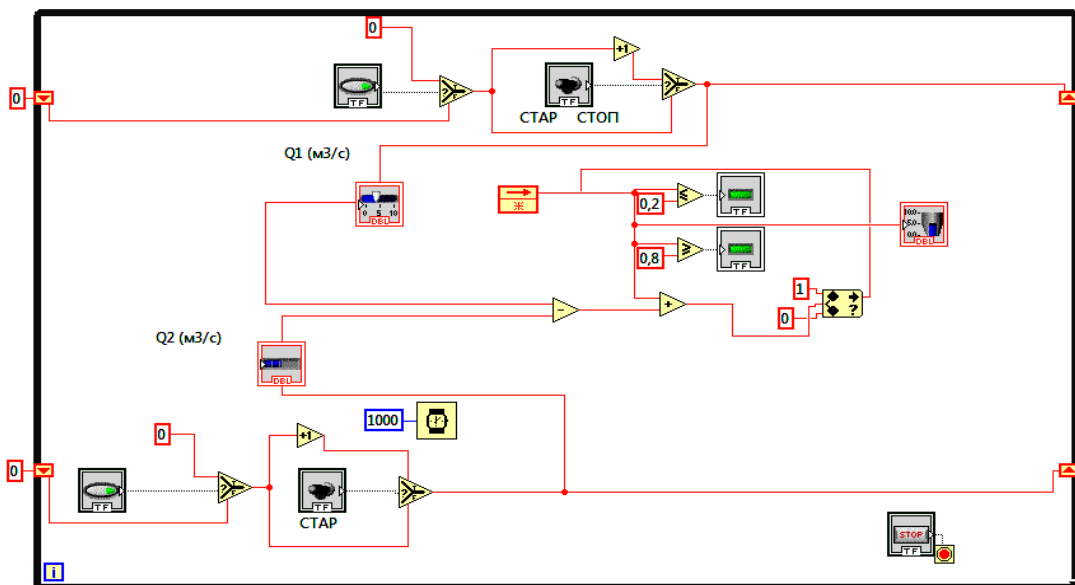


Рисунок 4.13. Блок-диаграмма графического программирования истечения молотого кофе из бункера объемного дозатора

Лицевая панель содержит: привод питателя устройства (конвейер для подачи молотого кофе), привод для объемного дозатора, переключатели стар-стоп (режим работы системы), датчики уровня (заполнено, пусто, измерение промежуточной координаты).

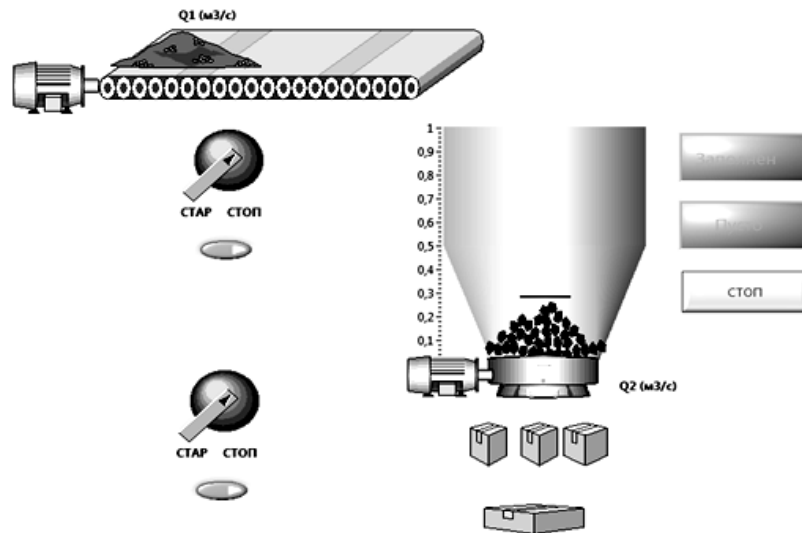


Рисунок 4.14. Лицевая панель задачи процесса истечения и заполнения частиц молотого кофе

Вторая задача заключается в решении условий и коды программирования для управления уровнем как промежуточная координата сыпучих продуктов МК в бункере стаканчикового дозатора и управления приводами устройств УПК и УДК с компенсацию действие рассмотренных факторов влияющих на процесс ДМК с помощью классических законов регулирования ПИ – контроллера. Программа представляет собой последовательность соединенных функциональных блоков в стиле «Matlab» на рисунке 4.15, где использовались разработанной имитационной модели предыдущей главы (п. 3.5) позволяющие определить влияние внешних возмущений физико-механических свойств сыпучих продуктов кофе и механических характеристик настройки приводов устройств подачи и дозирования.

Блок диаграмма задачи управления уровнем молотого кофе на рисунке 4.15, состоит из: передаточной функции двигателей привода дозатора и привода подачи продуктов МК; блок ПИ-регулятора; интегратор; блок датчика уровня;

блок датчика скоростей привода дозатора и привода подачи; блок описания математических формул «formule node», где описываются математические формулы на рисунке 4.16. Блок «formule node» содержит текстовый код программирования и позволяет поместить в блок-схему для выполнения математических операций из рассмотренных и полученных математических моделей и законов механики истечения сыпучих продуктов кофе и критерий управления процесса ДМК, удобно для программирования сложных выражений со многим числом переменных и решений математических моделей [155].

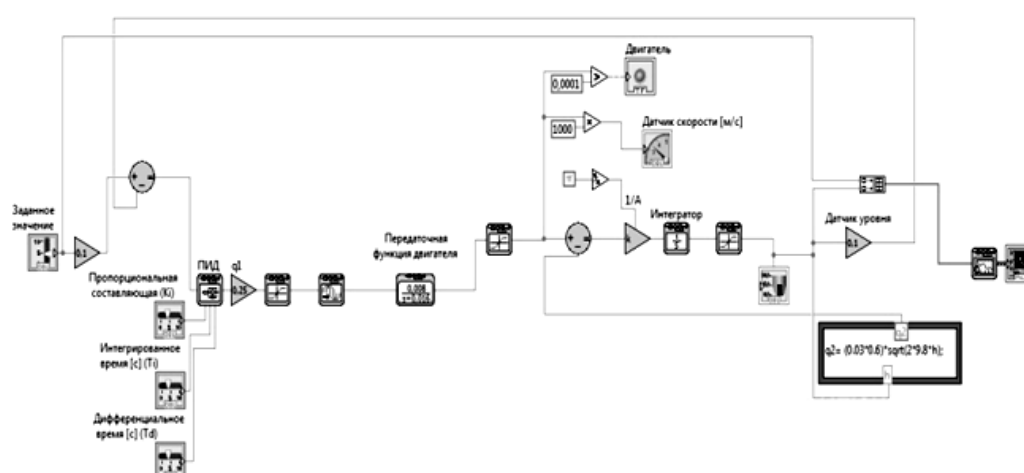


Рисунок 4.15. Блок-диаграмма задачи управления уровнем и приводами при настройке ПИ-регулятора имитационной модели процесса ДМК.

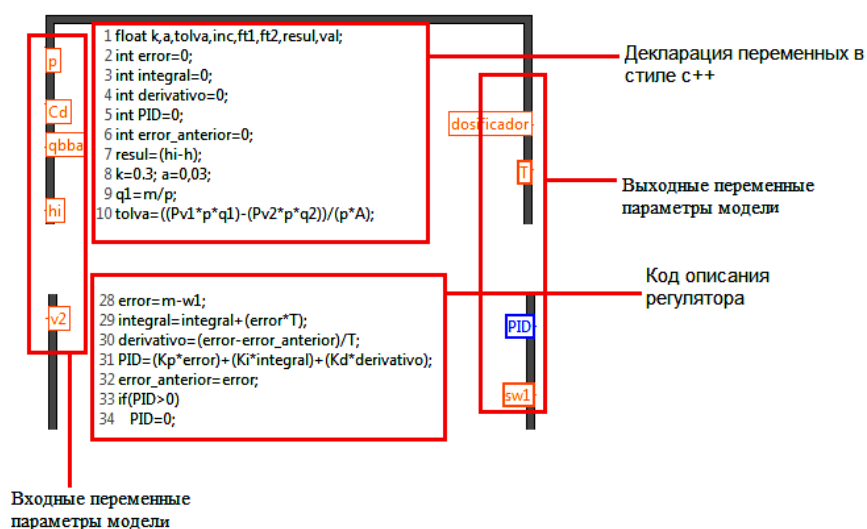


Рисунок 4.16. Блок описания математических моделей (formule node)

Декларация переменных описываются в стиле языка программирования си++. Такие переменные как PID – код описания ПИ регулятора, tolva – бункер дозатора, error – ошибка, result – результат конечного значения уровня молотого кофе и также оптимальные коэффициенты для ПИ регулятора полученных из разработанного нейросетевого оптимизатора (п. 4.2) для управления приводами устройств подачи и дозирования.

Таким образом, на базе разработанной имитационной модели в главе 3, был разработан макет ПАК для лабораторных исследований (рисунок 4.17 – 4.18) с целью эффективного управления процессом объемного дозирования пищевых продуктов, где учитываются физико-механических свойств показателей качества пищевых продуктов и сыпучих материалов в примере молотого кофе.



Рисунок 4.17. Лицевая панель программно-аппаратного комплекса технологического процесса ДМК разработана в среде «LabVIEW»

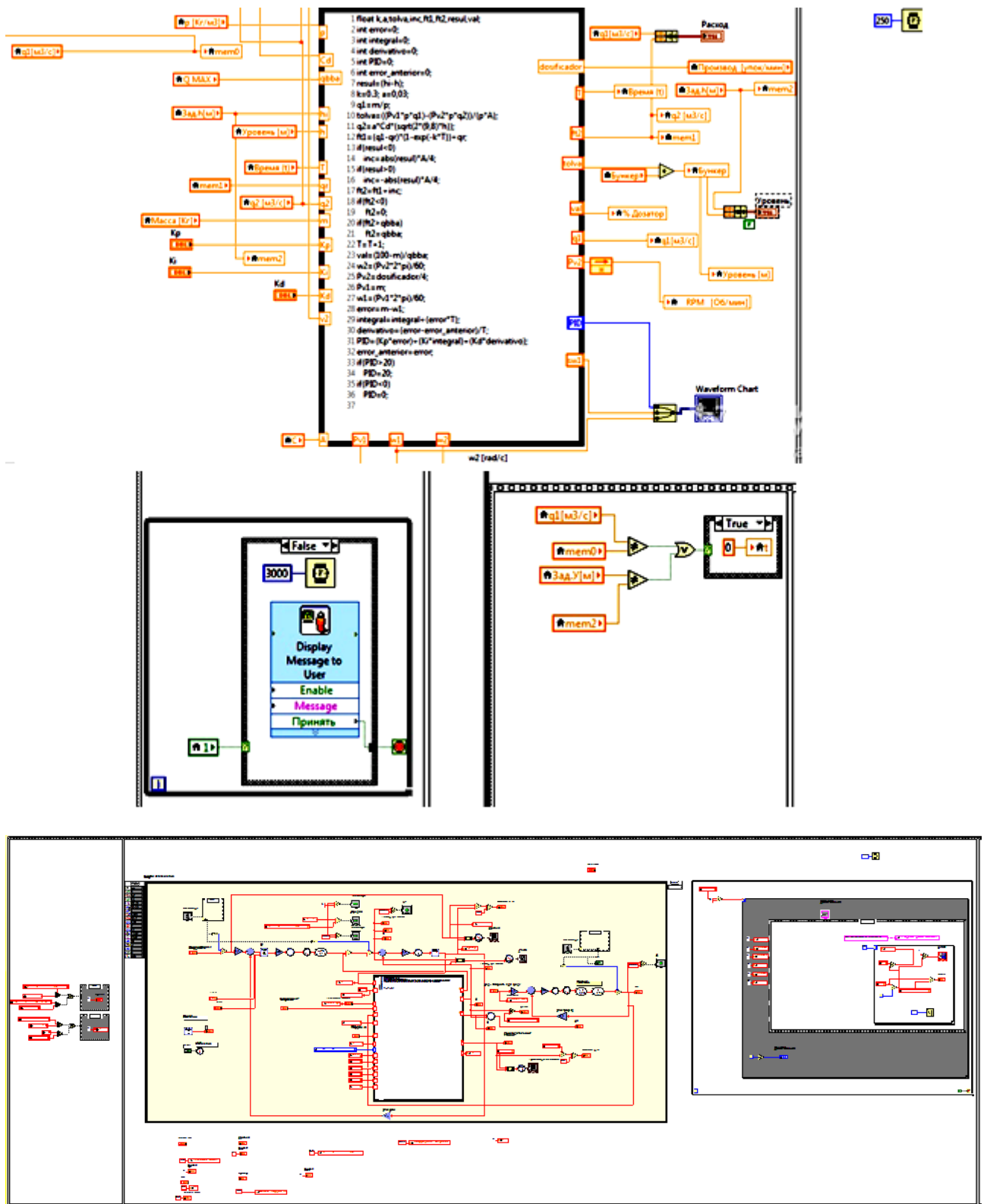


Рисунок 4.18. Блоки-диаграммы программно-аппаратного комплекса технологического процесса ДМК разработаны в среде «LabVIEW»

Разработанный макет программно-аппаратного комплекса позволяет исследовать влияние физико-механических свойств пищевых продуктов на

уровне материала и повысить производительность стаканчикового дозатора путем стабилизации промежуточной координата при внесении в блоке компенсаций оптимальные коэффициенты ПИ контроллера полученных в (п.4.2) для приводов устройств питателя и дозатора [121].

4.5. Структура экспериментального макета программно-аппаратного комплекса управления процессом ДМК. Описание программ на ЭВМ и апробация экспериментального макета в учебной деятельности

Программно-аппаратного комплекс управления процессом ДМК (экспериментальный макет) позволяет управлять процессом дозирования молотого кофе при наличии возмущающих факторов, которые влияют для стабильного и равномерного подачи молотого кофе в дозирующий механизм, чтобы повысить производительность и точность дозирования.

Лицевая панель состоит из: 1. Объемного стаканчикового дозатора, 2. бункера хранения пищевого продукта, 3. табло системы управления. 4. конвейера для подачи молотого кофе, 5. привода питателя, 6. привода дозатора, 7. фасовочно-упаковочного вертикального автомата, 8. графического индикатора, 9. сыпучего продукта (молотый кофе).

Программа запускается из лицевого панели и определяется заданные значения для контролируемых параметров: промежуточная координата для уровня молотого кофе в бункере СД, скорости приводов устройств питателя и дозатора. Также вводятся физико-механических свойств сыпучего материала, такие параметры как плотность, коэффициент истечения, коэффициент сыпучести. Процесс дозирования наблюдается в графических индикаторах, где показывается изменения уровня молотого кофе при изменении плотности и коэффициента истечения, а также объема молотого кофе зависимости от времени. При нестабильности процесса дозирования, регулируется скорости подачи и скорости дозатора молотого кофе для контроля уровня

промежуточной координаты в бункере СД. С помощью ПИ контроллера на основе полученных оптимальных коэффициентов ПИ нейросетевого оптимизатора осуществляется коррекция процесса дозирования.

Минимальные требования для практического построения разработанной ПАК рекомендуется использование персональные компьютеры с повышенными показателями защиты от вредных воздействий окружающей среды, такие как пыли, влаги и температуры с оперативной системе windows 7 и выше, драйверы для правильной работы программы LabView 2016 (32 bits) и файлы с расширением (*.vi). Для обработки, накопление информации о технологических параметрах аварийных, вывод на экраны ЭВМ сообщений ситуаций, данные могут быть реализованы через Microsoft Excel (в формат csv). Для задач хранения данных и реализации расчетов рекомендуется мощный процессор (intel Core i5, i7) с большим размером оперативной памяти.

Для разработки нейросетевого оптимизатора ПИ контроллера моделей удобнее всего использовать пакета моделирования Matlab 2016a, которое обладает всеми необходимыми качествами функции, поддерживает большое количество вариантов архитектур нейронных сетей, алгоритмов обучения и активационных функций и имеет подробную справочную информацию и графические интерфейсы.

Также создан инсталлятор предложений, который позволяет просто установить программу на компьютере как любая другая программа как бесплатная версия для студентов.

Структурная схема алгоритма управления процессом дозированием с коррекцией задания программного аппаратного комплекса автоматизированной системы управления процессом дозирования пищевых продуктов представлена на рисунке 4.19.

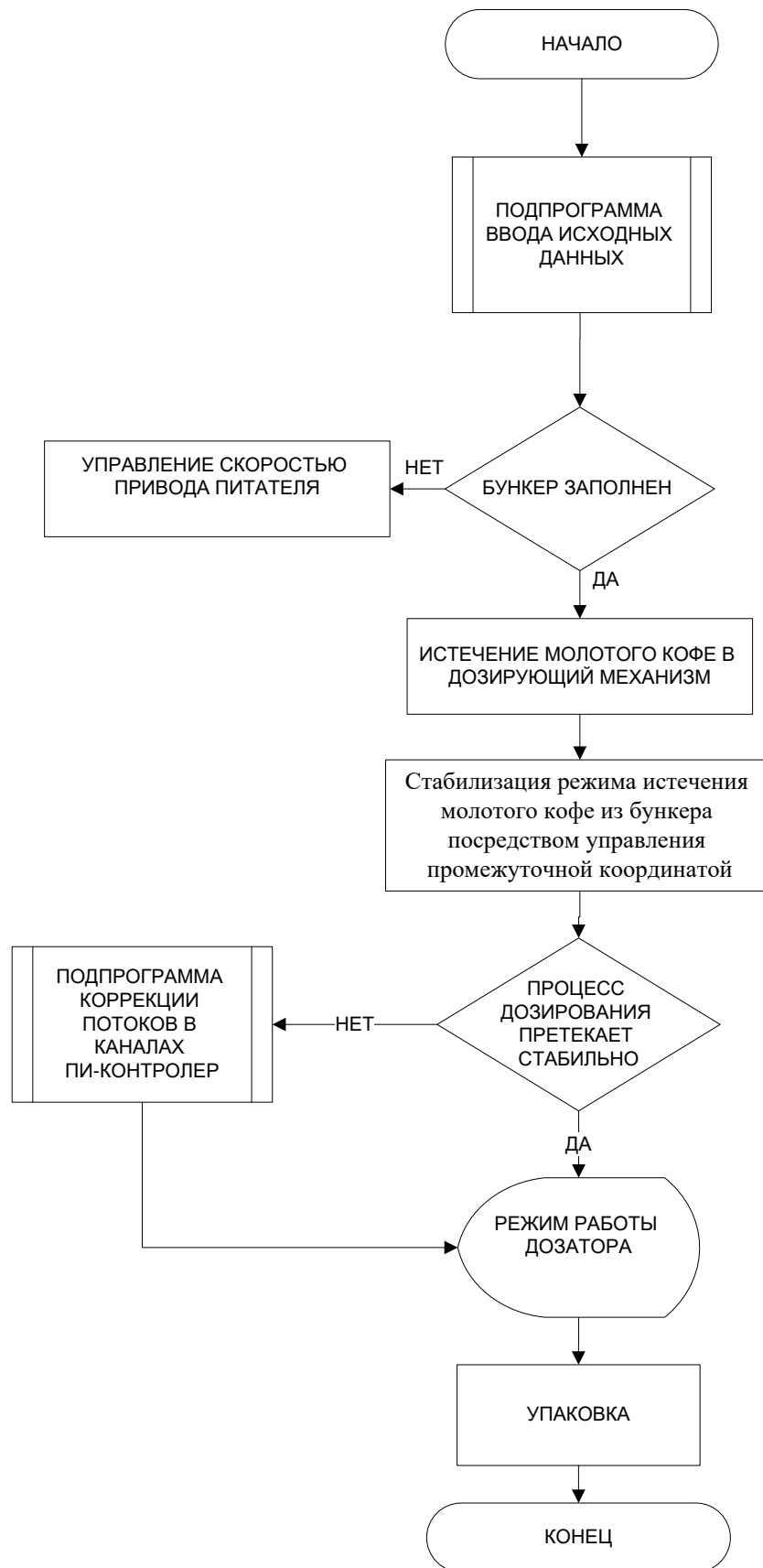


Рисунок 4.19. Алгоритм управления процессом дозирования молотого кофе с корректирующим воздействием

4.6. Выводы по четвертой главы

1. Разработан нейросетевой оптимизатор, для ПИ контроллера позволяющий найти оптимальные коэффициенты и сократить перерегулирование и время, так как при изменении заданных параметров управления промежуточной координаты и скорости приводов устройств в процессе дозирования с использованием один набор коэффициентов ПИ контроллера для всех режимов движений приводов не обеспечивает качества переходных процессов.

2. Система управления процессом дозирования молотого кофе оставалась устойчивой с точки зрения выбранных критериев управления производительности и промежуточной координаты. Таким образом, производительность и промежуточная координата двигаются стабильно, что позволяет повысить производительности стаканчикового дозатора.

3. Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать вывод о том, что созданная нейросетевого оптимизатора НСО ПИ контроллера позволяет сократить время и перерегулирование, а также сократить электроэнергию и вполне может стать прототипом универсального промышленного аппарата настройки параметров ПИ контроллера в процессе дозирования.

4. При стабильности и управлении величиной промежуточной координаты в бункере дозатора позволяет осуществить равномерное истечение продукта, избегать от сводообразования и сегрегации и устранить ошибки точности дозирования.

5. Оптимальные коэффициенты ПИ контроллера для привода дозатора при заданном значении $h = 0.7\text{м}$ составили $K_p = 0.01, K_i = 0.086$, а для привода питателя $K_p = 0.01, K_i = 0.0099$. Таким образом, при поступлении команды от ЭВМ о необходимости стабилизации уровня МК в бункере СД, регулирования скорости приводов питателя и дозатора – переходе в энергосберегающий режим, устройство УПК определяет загрузку МК в

соответствии с режимом работы стаканчикового дозатора и формирует необходимую, экономически выгодную, уставку по скорости в САР процесса ДМК. Система автоматического регулирования переводит частоту вращения приводного электродвигателя на заданную скорость УПК и УДК без опасных динамических нагрузок на устройство питателя и стаканчикового дозатора

6. Разработан макет программно-аппаратного комплекса управления процессом ДМК с помощью пакета LabVIEW для применения имитационной модели процесса дозирования на основе оптимальных коэффициентов ПИ контроллера нейросетевого оптимизатора, где представлены основные задачи и основные свойства разрабатываемого программного комплекса в языке программирования LabVIEW. Показано, что основными категориями решаемых данной задач моделирования являются: контроль, наблюдение (мониторинг), и регулирование процессов дозирования производства молотого обжаренного кофе для лабораторных исследований пищевых продуктов

7. Макет программно-аппаратного комплекса управления процессом ДМК назначено для улучшения современных программ обеспечения верхнего уровня, так как не позволяют представлять процесс движения среды в бункере за исключением отображения на мониторе мнемосхемы с имитацией заполнения бункера объемного дозатора и сам процесс дозирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований и обобщений в диссертации получены следующие научные и практические результаты:

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 ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

1. АСУ – автоматическая система управления
2. АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом
3. БСД – бункер стаканчикового дозатора
4. ДМК – дозирование молотого кофе
5. ИНС - искусственная нейронная сеть
6. МДЭ – метод дискретных элементов
7. МК – молотый кофе
8. НС – нейронная сеть
9. НСО – нейронный сетевой оптимизатор
10. ОУ – объект управления
11. ПАК – экспериментальный макет программно-аппаратного комплекса
12. САД – система автоматического дозирования
13. САЕ – система автоматического анализа проекта.
14. СД – стаканчиковый дозатор
15. СЗМ – сканирующий зондовый микроскоп
16. СКЗ – системы компьютерного зрения
17. УДК – устройство дозирования кофе
18. УДМ – устройство дозирования материала
19. УПМ – устройство подачи материала
20. УХМ – устройство хранения материала
21. ЭВМ – электронная вычислительная машина
22. САД – компьютерная поддержка проектирования
23. ПИ – пропорциональный, интегрирующий контроллер
24. VI – виртуальный инструмент
25. ТП – технологический процесс

- 26.САР – система автоматического регулирования
- 27.ФУА – фасовочно-упаковочного автомата
- 28.PI – коэффициенты ПИ-контроллера
- 29.PID – коэффициенты ПИД-контроллера
- 30.НСМ – нейросетевая модель
- 31.МФД – механизм формирования дозы

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизация технологических процессов пищевых производств./Под ред. Е.Б.Карпина.-М: Агропромиздат, 1985.-531 с.
2. Акимов Н.В., Андропова Н.И., Гаврюшин Н.М. и др. Упаковка грузов. Справочник. —М. Транспорт. 1992. —380 с.
3. Андреев Г.Н., Грибков А.А. Дозатор материалов. Информационный листок МГЦНТИ № 42-98.
4. Андреев Г.Н., Грибков А.А. Технология повышения точности дозирования материалов. Информационный листок МГЦНТИ № 43-98.
5. Антипов С.Т., Кретов И.Т., Остриков А.Н., Панфилов В.А. и др., Машины и аппараты пищевых производств: учебник в 2 кн. М.: Высшая школа, 2001 — 703 с. Р1.3
6. Арет В.А., Николаев Б.Л., Николаев Л.К. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции. Учебное пособие. СПбГУНиПТ, ГИОРД 2009, - 448 с. Р1.3
7. Аркатова А.С., Воробьева Л.Н. , Татарченко И.И., Половченя А.А. Определение показателей качества натурального ароматизированного кофе: Сб. матер. II межд. науч.-технич. конф. «Новое в технике и технологии пищевых производств». – Воронеж, 2010. – С. 72-73. Р1.2
8. Аркатова А.С., Воробьева Л.Н. , Татарченко И.И., Половченя А.А. Совершенствование технологии производства натурального ароматизированного кофе // Техника и технология пищевых производств. – Кемерово, 2010. – № 2. – С. 13-16. Р1.2
9. Аркатова А.С., Воробьева Л.Н. , Татарченко И.И., Половченя А.А. Совершенствование технологии производства натурального ароматизированного кофе // Техника и технология пищевых производств. – Кемерово, 2010. – № 2. – С. 13-16. Р1.3

10. Аркатова А.С., Татарченко И.А., Татарченко И.И. Дегустационная оценка качества кофе и кофейных продуктов: Сб. науч. трудов ВНИИТТИ. – Краснодар, 2012, выпуск 180. – С. 104-112.
11. Аркатова А.С., Татарченко И.А., Татарченко И.И. Особенности разработки технологии ароматизированных кофе и кофейных продуктов // Известия вузов. Пищевая технология. – Краснодар, 2012. – № 4. – С. 69-71.
12. Аркатова А.С., Татарченко И.А., Татарченко И.И. Совершенствование технологии получения натурального ароматизированного молотого кофе // Известия вузов. Пищевая технология. – Краснодар, 2013. – № 1. – С. 55-57.
13. Аркатова А.С., Татарченко И.А., Татарченко И.И. Технология натурального ароматизированного молотого кофе: Сб. матер. VIII межд. науч. конф. «Техника и технология пищевых производств». – Могилев, 2013. – 40с.
14. Аркатова А.С., Татарченко И.И. Способы повышения качества ароматизированного кофе и кофейных продуктов: Сб. матер. науч.-практич. конф. «Научное обеспечение производства сельскохозяйственной и пищевой продукции высокого качества и повышенной безопасности». – Краснодар, 2011. – С. 220-226.
15. Аркатова А.С., Татарченко И.И. Способы повышения качественных характеристик декофеинизированного кофе: Сб. матер. VIII межд. науч.-технич. конф. «Техника и технология пищевых производств». – Могилев, 2011. – 91с.
16. Арсентьев В. А., Блехман И. И., Блехман Л. И., Вайсберг Л. А., Иванов К. С., Кривцов А. М. Методы динамики частиц и дискретных элементов как инструмент исследования и оптимизации процессов переработки природных и техногенных материалов // Обогащение руд. 2010. № 1. С. 30-35.
17. Ахремчик, О.Л. Особенности моделей средств автоматизации для диагностики семантических ошибок при проектировании / О.Л. Ахремчик // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. №4. С. 17–20.

- 18.Ахремчик, О.Л. Система автоматизации как составляющая современной технологии выращивания сельскохозяйственных культур в теплицах / О.Л. Ахремчик //Вестник Тверского государственного университета. Серия: экономика и управление. 2011. №7. С. 73–75.
- 19.Ахремчик, О.Л. Структуризация знаний о процессе схемного проектирования систем управления / О.Л. Ахремчик // Программные продукты и системы. 2009. №3. С. 32–36.
- 20.Ахремчик, О.Л. Когнитивные искажения в процессе проектирования систем автоматизации / О.Л. Ахремчик // Вестник Тверского государственного технического университета. 2012. №2 (22). С. 106–107.
- 21.Бабинец В.М. Исследование и оптимизация параметров грузоприемного конвейера устройств измерения потоков сыпучих материалов на горных предприятиях. Автореферат диссертации на соискание канд. техн. наук. Караганда, 1973. — 28 с.
- 22.Безручко Б. П., Смирнов Д. А. Математическое моделирование и хаотические временные ряды. — Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2005. — ISBN 5-94409-045-6.
- 23.Благовещенская М. М. Информационные технологии систем управления технологическими процессами [Текст] : учеб. пособие для вузов / М. М. Благовещенская, Л. А. Злобин. — М. : Высш. шк., 2005. — 768 с.
- 24.Благовещенская М. М., Благовещенский И.Г., Назойкин Е.А. Методика автоматической оценки качества пищевых изделий на основе теории искусственных нейронных сетей. // «Пищевая промышленность», №2 , 2015. — с. 42 - 45 (общ. объем 0,3 п.л.)
- 25.Благовещенская М.М. Автоматика и автоматизация пищевых производств: Учебник для студентов инженерно-технологических специальностей пищевых высших учебных заведений/ М.М. Благовещенская, Н.О Воронина, А.В. Казаков, И.К. Петров, Е.А. Прокофьев. Москва 1991 г. С. 81-83.
- 26.Благодарский В.А. и др. «Машины-автоматы для упаковки пищевых продуктов (справочник). —Киев., «Техника», 1985.

27. Богатырев А.А., Филиппов Ю.Д. Стандартизация статистических методов управления качеством. М., Изд-во "Стандартов", 1989 г.
28. Богомягких, В.А., Пепчук А.П. Интенсификация разгрузки бункерных устройств в условиях сводообразования зернистых материалов / В.А. Богомягких, А.П. Пепчук - Зерноград, 1996. - 164 с
29. Брежнев Б.П., Круглик В.И., Рязанов О.В., Товбин Л.И. Весовые дозаторы непрерывного действия// Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность, 1986.—№ 10,—С. 20-22.
30. Бровко Н.И., Симутенко В.В. Современное оборудование для завертки, фасовки и упаковки кондитерских изделий (обзор). — М. ЦНИИТЭИ легпищемаш, 1971.— 44 с.
31. Букреев В.Г., Краснов И.Ю. Оценка робастности алгоритмов управления нестационарными электромеханическими объектами // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – 1№ 2. – С. 145–148.
32. Букреев В.Г., Краснов И.Ю., Чашин А.К., Соснин С.К. Оптимизация нестационарных электромеханических систем с дискретным управлением // Известия Томского политехнического университета.
33. Бурляй Ю.В., Сухой Л.А. Оборудование для укладки и упаковки штучных изделий в тару. — М . Машиностроение, 1975.—280.
34. Бурцев А. Г., Матюнина Е. В. Автоматизация процесса дозирования сыпучего материала с учетом заданного расхода воды и флотореагента // Молодой ученый. — 2016. — №10. — С. 134-137.
35. Варламов, А. В. Исходные предпосылки к составлению обобщенной математической модели динамической системы «Бункерное устройство с сыпучим материалом сводообразование механизм разрушения сводообразования [Текст] / А.В. Варламов // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 2 (12). – С. 79–89.
36. Видинеев Ю.Д. Дозаторы непрерывного действия. — М . Энергия, 1978, — 180 с. 134

37. Видинеев Ю.Д. Дозаторы непрерывного действия. - М.: Энергия, 1978. – 184 с.
38. Видинеев, Ю.Д. Дозаторы непрерывного действия / Ю.Д. Видинеев. – М.: Энергия, 1981. – 273 с.
39. Володин А.А., Лубенцова Е.В. Выбор критерия эффективности и оптимальных условий управления и моделирования процесса // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11–1. – С. 109-115;
40. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. заведений. изд. 2-е, перераб. и доп.-Ленинград: Энергия, 1974.
41. Генералов, М. Б. Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии / М. Б. Генералов. - Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. - 592 с. Р1.3
42. Галонска М.К., Прейс В.В. Модели, варианты и принципы синтеза структур роторных систем автоматической загрузки // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 12. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. С. 30-40.
43. Гениев, Г.А. Вопросы динамики сыпучей среды. / Гениев Г.А. Научное сообщение ЦНИИСК. Вып. 2, М.: Госстройиздат, 1958. 122 с.
44. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1971. – 280 с.
45. Гончаров А.И. и др. Пути и методы обеспечения точности фасования при объемном дозировании.— Каунас: Сборник трудов всесоюзной науднотехнической конференции «Перспективы развития упаковочного оборудования». 1985
46. ГОСТ 28195-89. Оценка качества программных средств. Общие положения / Москва: ИПК Издательство стандартов, 1989. 31 с.
47. ГОСТ 24508-80. Концентраты пищевые. Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение. Технические условия: Сб. ГОСТов. - М.: Стандартинформ, 2011.
48. ГОСТ Р 52088-2003. Кофе натуральный жареный. Общие технические условия. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.

- 49.Грибков А.А. Повышение точности и производительности автоматизированных систем весового порционного дозирования материалов // "Мехатроника, Автоматизация, Управление". - 2010. - №9. - С. 61-65.
- 50.Григорьев С.Н., Грибков А.А. Обобщенная оценка точности элементов дозирующей системы // Вестник машиностроения. - 2010. - №8. - С. 41-42.
- 51.Григорьев С.Н., Грибков А.А. Определение общих требований к точности элементов дозирующей системы // Технология машиностроения. - 2010. - №3. - С. 3-5.
- 52.Груба В.И., Никулин Э.Н., Оглобченко А.С. Технические средства автоматизации в горной промышленности. К.: ИСМО, 1998. – 378 с.
- 53.Грубов В.В, Ткачев В.С, Ужеловский В.А. Оптимизация процесса весового дозирования сыпучих материалов // «Технические науки», г. Днепропетровск, Украина, Приднепровская Государственная Академия Строительства и Архитектуры,. 2007. №15.
- 54.Гуревич А. Л., Соколов М. В. Импульсные системы автоматического дозирования агрессивных жидкостей. — М., 1973.
- 55.Давиденко П.Н. Исследование и разработка методов проектирования информационных систем на основе дозаторов дискретного действия: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Таганрог, 2005. - 192 с.
- 56.Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. — СТА, №4, 2006 г., стр. 66-74
- 57.Дженике Э.В. Складирование и выпуск сыпучих материалов: Пер. с англ. М.: Мир, 1968. 164 с.
- 58.Джулаева Ж. Т. Исследования нелинейного корректирующего устройства замкнутой системы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель» на ЭВМ [Текст] // Технические науки: теория и практика: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Чита, апрель 2016 г.). — Чита: Издательство Молодой ученый, 2016. — С. 69-72.

- 59.Донской, Д. А. Моделирование искусственных нейронных сетей в системе MATLAB. Часть 2. Линейные сети: метод. указания к выполнению лабораторных работ / Д. А. Донской. — Пенза: Пензенский гос. ун-т, 2005. —33 с.
- Дмитриев П.Н., Прокопович В.Т. Дозатор сыпучих материалов. А.С. № 530184. Опубликовано 30.09.76, Бюллетень № 36.
- 60.Дмитриев П.Н., Прокопович В.Т. Дозатор сыпучих материалов. А.С. № 530184. Опубликовано 30.09.76, Бюллетень № 36.
- 61.Дроздов. Н.Д. Постановка задачи в прикладных математических исследованиях. Тверской Государственный Университет // Учебно-методическое пособие по курсу «История и методология прикладной математики» Тверь: Твер. гос. ун-т, 2006. 303 с.
- 62.Жидонис В.Ю. и др. Исследование точности дозирования разных сортов круп объемными дозаторами.— Каунас; Сборник трудов Всесоюзной научно-технической конференции «Упаковочная техника», 1972.
- 63.Закирничный В.С. и др. Разработка математической модели и алгоритма определения среднего качества мукомольного сырья в процессе загрузки и разгрузки накопительного бункера / В.С. Закирничный, И.Б. Лаврищев // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств», 2013. - №2. [Электронный ресурс]: <http://www.processes.ihbt.ifmo.ru>
- 64.Зенков, Р. Л. Бункерные устройства [Текст] / Р. Л. Зенков, Г. П. Гриневич, В. С. Исаев. – М. : Машиностроение, 1966. – 234 с.
- 65.Зенков, Р. Л. Механика насыпных грунтов (основания расчета погрузочно - разгрузочных и транспортных устройств) [Текст] : производственно-практическое издание / Р.Л. Зенков. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : Машиностроение, 1964. - 252 с. : рис., табл., граф. - Библиогр.: с.246. - (в пер.) : 0.88 р.
- 66.Идентификация и фальсификация кофе. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://znaytovar.ru/new772.html>

67. Ильинский Н. Ф. Основы электропривода: Учебное пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство МЭИ, 2003. — С. 220. — ISBN 5-7046-0874-4.
68. Казаков Ю.Р. Возможные пути совершенствования питателей для высокоточного дозирования сыпучих зерновых продуктов / Казаков Ю.Р. Антуфьев В.Т.//Вестник Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2014. № 4. С. 19 - 20
69. Калачев М.В. Классификация приборов для определения свойств пищевых структур. Пищевая промышленность, №2, 1989.
70. Калачев М.В., Рамадан А.Р. Стаканчиковые дозаторы для гранулированных продуктов. «Тара и упаковка», № 3 . 1998, стр. 20-21.
71. Калачев М.В., Рамадан А.Р. Экспериментальные исследования стаканчиковых дозаторов для гранулированных продуктов в составе фасовочных машин. // «Тара и упаковка», № 3, 1999..
72. Карпин Е.Б. Средства автоматизации для измерения и дозирования массы. Расчет и конструирование. - М.: Машиностроение, 1971. - 469 с.
73. Катыльмов А.В., Любартович В.А.. Дозирование сыпучих и вязких материалов. - Л.: Химия, 1990.
74. Климентьев Е.К. Основы графического программирования в среде LabVIEW. Учебное пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2002 г. - 65с.
75. Колбасин А.М. Автоматизация технологического процесса управления производством многокомпонентных сыпучих бетонных смесей с учетом ошибок дозирования: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - М., 2007. - 151 с.
76. Колязов, К. А. Система управления энергозатратами для технологических процессов на основе нечетких алгоритмов (на примере автоматизации технологических установок в молочно-консервной промышленности): 05.13.06 / К. А. Колязов; Уфимский государственный авиационный технический университет. – Уфа, 2010. – 19 с.

- 77.Кофе оптом. Кофе Эквадор. [Электронный ресурс]. Режим доступа:
http://cofeoptom.ru/coffee_countrys/coffee_ecuador.html
- 78.Краснов. И.Ю. Исследование системы автоматизированного высокоточного дозирования сыпучих материалов объектами // Известия Томского политехнического университета. № 4 / том 311 / 2007
- 79.Краснопрошина А.А. и др. Современный анализ систем управления с применением Matlab. 1999.Казаков Е.Д., Кретович В.Л. Биохимия зерна и продуктов его переработки М.: Колос,1980.
- 80.Красовский А.А. Интегральные оценки и критерии качества регулирования. Техническая кибернетика. -Л: Машиностроение. 1967. -627 с.
- 81.Кривцов А.М. Деформация и разрушение твердых тел смикроструктурой. – М.: Физматлит, 2007, 304 с.
- 82.Круглов В.В., Дли М.И., Голупов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – 221 с.
- 83.Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в Матлаб. – СПб: Питер, 2005.
- 84.Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М. Машиностроение. 1973, с. 216.
- 85.Машины и аппараты пищевых производств: В 2 кн. Кн.2: Учеб. для вузов: / С.Т. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков и др.; Под ред. акад. РАСХН В.А. Панфилова. – М.: Высшая. школа., 2001. – 680 с.
- 86.Мордасов Д. М. Технические измерения плотности сыпучих материалов: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 80с.
- 87.Мордасов М.М., Мордасов Д.М., Булгаков Н.А. Пневматические времяимпульсные методы контроля объема, массы и плотности сыпучих материалов. Тамбов: ТГТУ, 1999. 18 с. Деп. в ВИНТИ №3423-В99 г. Москва.
- 88.Оборудование для механической переработки в пищевых производствах: учеб.пособие / В.Н. Долгунин [и др.]. – Тамбов: Изд. ТГТУ, 2005. – 80 с.

- 89.Определяющие законы механики грунтов // Механика. Новое в зарубежной технике: сб. ст. – М., 1975. – 280 с.
- 90.Орлов С.П. Весы и дозаторы. -М.; Машиностроение. 1972. -328 с.
- 91.Остапчук Н.В. Основы математического моделирования процессов пищевых производств: Учебное пособие. – 2 –е изд., перераб. и доп. – К.: Выщашк., - 1991. – 367 с.
- 92.Остроух А.В., Айсарина А.А. Разработка автоматизированной системы управления бетоносмесительной установкой с двухвальным смесителем // Автоматизация и управление в технических системах. 2015. № 1. С. 51–59. DOI: 10.12731/2306-1561-2015-1-7.
- 93.Панишев В.Г. Оптимизация технологических процессов и кинематических схем упаковочных автоматов. Каунас: Сборник трудов Всесоюзной науднотехнической конференции «Упаковочная техника», 1972.
- 94.Панишев В.Г., Балашов В.Е. Исследование мерных элементов объемных дозаторов дискретного действия. —М.: МТИПП, 1978.
- 95.Панишев В.Г., Маршалкин Г.А., Товбин Л.И. Расчет трубчатых дозаторов для драже.— Хлебопекарня и кондитерская промышленность, 1979, № 7.
- 96.Панишев В.Г. Исследование точности дозирования в объемных дозаторах дискретного действия. Сборник: Лабораторный практикум по системам ПИРС, УИРС для технологического оборудования предприятий пищевой промышленности.—М.:ЦНИИТЭИ, 1977.
- 97.Панфилов В.А. Наудные основы развития технологических линий пищевых производств. —М. Агропромиздат. 1986.— 246.
- 98.Пат. РФ 125432. Технологическая линия по производству натурального ароматизированного молотого кофе / А.С. Аркатова, И.А. Татарченко, И.И. Татарченко. Заявка № 2012128279; Заявл. 03.07.2012; Опубл. 10.03.13; Бюл. № 7.
- 99.Первозванский А.А. математические модели в управлении производством. - М.: Наука, 1975. -616 с.

100. Пестов Н.Е. Физико-химические свойства зернистых и порошкообразных химических продуктов. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1947. 239 с. Р1.3
101. Поведение зерна как сыпучего материала. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.activestudy.info/povedenie-zerna-kak-sypuchego-materiala>.
102. Попов Е. П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. — М.: Наука, 1988. Терехов В. Н., Осипов О. И. Системы управления электроприводов. — М.: Академия, 2006.
103. Проектирование и производство фасовочно-упаковочного оборудования. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.automatica.kiev.ua/tb080.html>.
104. Разработка имитационных моделей в среде MATLAB: Методические указания для студентов специальностей 01719, 351400/Сост. А. М. Наместников. – Ульяновск, УлГТУ, 2004. – 72с.
105. Рамадан А.Р., Калачев М.В. К определению скорости и производительности объемного стаканчикового дозатора.//Материалы 5-ой международной научно-практической конференции «Современные проблемы в пищевой промышленности»: Вып. А. МГЗИПП, М., 1999, Стр. 193.
106. Ратников С.А., Шушпанников А.Б., Иванец Г.Е. Взаимосвязь между параметрами дискретного дозирования и динамическими характеристиками смесителя. Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, г. Кемерово. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств» № 1, 2015.
107. Ромакин Н.Е. Машины непрерывного транспорта: учеб. пособие для студ. высш. учеб. зав. М.: Изд-во Академия, 2008. 432 с.
108. Рогинский, Г.А. Дозирование сыпучих материалов / Г.А. Рогинский. Москва, Химия, 1978. 1.3
109. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.: ил.

110. Сагитов П. И., Тергемес К. Т., Шадхин Ю. И. Параметрический синтез системы управления многодвигательного асинхронного электропривода. // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. — 2011. — № 2(13). Алексеев Е. Р., Чеснокова О. В. MATLAB 7 / Алексеев Е. Р., Чеснокова О. В. — М.: НТ Пресс, 2006.
111. Сажин С.Г., Смирнов И.В. Состояние и проблемы автоматизации процессов непрерывного дозирования сыпучих материалов // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – № 11 – С. 76-77
112. Сантос Куннихан 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.
113. Сантос М. Р. Определение состава фракций молотого кофе на основе зондовой микроскопии //Вестник Тверского государственного технического университета, №2 (24), 2013. с.17-20.
114. Сантос М. Р. Определение эквивалентных размеров частиц при гранулометрическом анализе молотого кофе//Вестник Тверского государственного технического университета, №1 (23), 2013. с.24-27.
115. 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
116. 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.
117. 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.
118. 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.
 119. Сантос М.Р. Задача измерения влажности кофе. Сборник трудов магистрантов и аспирантов. Вып. 3. Тверь, РИЦ ТвГТУ. 2013. С. 50-53.
 120. 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).
 121. 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).
 122. Сантос М.Р. Фреймовый подход к описанию дозаторов сыпучих материалов. Сборник трудов магистрантов и аспирантов. Вып. 2. Тверь, РИЦ ТвГТУ. 2012. С. 134-137.
 123. 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.
 124. 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.
125. 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.
 126. 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.
 127. Сборник технологических инструкций по производству карамели, конфет, ириса, шоколада, порошка какао, мармеладно-пастильных изделий, драже и халвы. М. Пищепромиздат, 1960.
 128. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебник для ВУЗов. - 2-е изд. СПб.: Питер, 2006 - 751 с.
 129. Сеницын Б. Н., Ерохин А. С. Дозаторы непрерывного действия - средства автоматизации процессов дозирования. Обзорная информация. —М., 1982.— 48 с.
 130. Скудина А. А. О скважности зернового потока, выходящего из выпускного отверстия бункера наибольшей пропускной способности [Текст] / А. А. Скудина // Молодой ученый. — 2015. — №14. — С. 188- 191
 131. Соколовский В. В., Статика сыпучей среды, 3 изд., М., 1960.
 132. Спиваковский О.А., Дьячков В.Ю. Транспортирующие машины. М.: Машиностроение, 1983. 305 с.
 133. Смирнов Н.М. Исследование процесса тонкого помола и разработка методики расчета гранулометрического состава материала, измельченного в мельницах ударно-отражательного действия: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Иваново, 1977. 25 с.
 134. Урьев, Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов /Н.Б.Урьев. – М.: Химия, 1988. – 256 с.

135. Учебный курс Labview. Основы I. National Instruments corp., 2002. 6. Labview user manual. National Instruments corp., 2007.
136. Федосеев В.Б., Зацаринная И.А. Стохастический характер образования динамических сводов при установившемся режиме истечения сыпучих материалов из бункеров // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. № 1, Ч. 1, 2011 с. 196 – 199.
137. Фоменко А.И. Выбор автоматического регулятора скорости ленты конвейера и обоснование его параметров при переводе работы электропривода в энергосберегающий режим. XI международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех - 2010»: материалы конференции (18-20 марта 2010 г., Ухта): в 4 ч; ч. 1. - Ухта: УГТУ, 2010
138. Хайкин, С. Нейронные сети : Полный курс / Саймон Хайкин ; пер. с англ.: Н.Н. КуССуль и А.Ю. Шелестов ; Ред.: Н.Н. КуССуль. — 2-е изд. — М. [идр.] : Вильямс , 2006. — 1103 с.
139. Хемди А. Таха Глава 18. Имитационное моделирование // Введение в исследование операций (Operations Research: An Introduction). — 7-е изд. — М.: «Вильямс», 2007. — С. 697-737. — ISBN 0-13-032374-8.
140. Хокни Р. Численное моделирование методом частиц./Хокни Р., Иствуд Дж. / Пер. с англ.,М. Мир. 1987.- 640с.
141. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах, Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», М., 1968, 400 стр.
142. Численное исследование актуальных проблем машиностроения и механики сплошных и сыпучих сред методом крупных частиц / Под ред. Ю.М.Давыдова. — М.: Национальная Академия прикладных наук, Международная ассоциация разработчиков и пользователей метода крупных частиц, 1995 . — Т.2. - С. 573.
143. Чукова О. В. Математическое моделирование движения предмета обработки в бункере вибраторного автоматического загрузочного

- устройства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки , №4 (2), 2010. с.14-19.
144. Шаверин А.В., Благовещенская М.М., Благовещенский И.Г. Автоматизация контроля органолептических показателей качества шоколадных изделий // Материалы первой международной научно-практической конференции – выставки «Планирование и обеспечение подготовки и переподготовки кадров для отраслей пищевой промышленности и медицины». - М.: Издательский комплекс МГУПП, 2012. С. 209 – 212.
 145. Шубин, И.Н. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства: учеб. пособие / И.Н. Шубин, М.М. Свиридов, В.П. Таров. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 76 с.
 146. Шухин, В. В. Использование дозаторов в технологических линиях периодического приготовления строительных смесей / Марсов В.И., Тихонов А.Ф., Бокарев Е.И. // Журнал «Механизация строительства», – М.: 2011. – № 9. – С. 14-15.
 147. Шухин, В.В. Дозаторы непрерывного действия с компенсацией возмущения входного потока материала / Марсов В.И., Суэтина Т.А., Колбасин А.М. // Механизация строительства. 2013. - № 2.-С. 32-34.
 148. Яковлев А. В. Методы, модели и алгоритмы формирования и анализа изображений в системе контроля качества материалов и продукции машиностроительного предприятия: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Прософт. – М., 2003. – 168 с
 149. Ingeniería Química, Vol 3: "Flujo de fluidos". E. Costa Novella; Ed. Alhambra Universidad, 1ªed, 1985.
 150. 2nd International Conference on Discrete Element Methods, Editors Williams, J.R. and Mustoe, G.G.W., IESL Press, 1992 ISBN 0-918062-88-8
 151. Acevedon, J.L. Influencia del agua de apagado sobre el color, la densidad aparente, el contenido de humedad y en general las propiedades fisico quimicas del cafe tostado. Manizales, Universidad Nacional de Colombia, 1996. 119p.

152. Avner, S. H. "Introducción a la Metalurgia Física. Segunda Ed." McGraw-Hill, 1984.
153. Bicanic, Ninad, Discrete Element Methods in Stein, de Borst, Hughes Encyclopedia of Computational Mechanics, Vol. 1. Wiley, 2004. ISBN 0-470-84699-2.
154. Bolton, W. (2004). Instrumentation and control systems. Oxford: Newnes.
155. Bress, T. Effective Labview Programming: (*new file uploaded 02/19/15). — NTS Press, 2013. — 720 p. — ISBN 9781934891087.
156. Cleve Moler. The Origins of Matlab // MathWorks.com. 2004. URL: http://www.mathworks.com/company/newsletters/news_notes/clevescorner/dec04.html
157. Duran, J., Reisinger A., Sands, Powders, and Grains: An Introduction to the Physics of Granular Materials. Noviembre de 1999, Springer-Verlag New York, Inc., New York, ISBN 0-387-98656-1.
158. Guevara B., R. A. Caracterización granulométrica del café tostado y molido colombiano. Manizales, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2000. 131 p. (Tesis: Ingeniero Químico).
159. Holdich, R.G., Fundamentals of Particle Technology, Midland Information Technology and Publishing, United Kingdom, 2002. f Thomson, F. M., "Storage and Flow of Particulate Solids", Capítulo 8 en Handbook of Powder Science & Technology, editado por Fayed, M. E., Otten, L., Chapman & Hall, N.Y., 1997.
160. Holland, F.A. y Bragg, R."Fluid Flow for Chemical Engineers". Edward Arnold (1995).
161. Lim K.W., Andrade J. E., C. F. Avila, and I. Vlahinich. Granular Element Method for Computational Particle Mechanics. 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2012), Sao Paulo, Brazil, 8-13 July 2012.
162. Amorós J.L., Mallol G., Sánchez E., García J.. Diseño de silos y tolvas para el almacenamiento de materiales pulverulentos. Problemas asociados a la operacion de descarga. Instituto de Tecnología Cerámica (ITC) Asociación de Investigación

- de las Industrias Cerámicas (AICE) Universitat Jaume 1. Castellón. España. 2000 C 58.
163. Jenike, A. W. Gravity flow of solids. Bulletin of the University of Utah. No 123, 1961.
 164. Jenike, A. W. Storage and flow of solids. Bulletin of the University of Utah. 53(26), 1964.
 165. Jenike, A. W.; JOHANSON, J. R. Review of the principles of flow of bulk solids. CIM Trans.,73, 141-146, 1970.
 166. Jesús Gadea Sáinz. Materiales de construcción: problemas de dosificación, Universidad de Burgos, 2011 . 112 págs.
 167. Jesús Gadea Sáinz. Materiales de construcción: problemas de Granulometría, Universidad de Burgos, 2015 . 184 págs.
 168. Jose Jaime Castano Castrillon, Martha Mercedes Ramos Arevalo, Empaque y Almacenamiento de Café Tostado y Molido, bajo Vacío, y Atmósferas de N2, y CO2 Estado: Tesis concluida ,1998.
 169. Jose Jaime Castano Castrillon, Paula Cristina Cuellar Soares, Normalización de la Densidad Aparente del Café Tostado y Molido y de la Concentración del Extracto de Café Universidad Nacional De Colombia - Sede Manizales Estado: Tesis concluida Ingeniería Química ,1999
 170. Lim K.-W. and Andrade J. E. Granular Element Method for Computational Particle Mechanics. The 23th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Beijing, China, 19-24 August 2012.
 171. Arteaga P., Flow of binary mixtures of equal-density granules in hoppers size segregation, density and discharge rates, Chem. Eng. Sci. 45 (1990), 205.
 172. Cundall P.A., O.D.L. Strack, A distinct element model for granular assemblies. Geotechnique, 29:47—65, 1979.
 173. Pande, G., Beer, G. and Williams, J.R., Numerical Modeling in Rock Mechanics, John Wiley and Sons, 1990.

174. Shi, G, Discontinuous deformation analysis — A new numerical model for the statics and dynamics of deformable block structures, 16pp. In 1st U.S. Conf. on Discrete Element Methods, Golden. CSM Press: Golden, CO, 1989.
175. Smith, C (1997). Principios y prácticas de automatización en procesos de control. Segunda edición.
176. Trueba Coronel, Samuel. Hidraulica. Compañía editorial continental. Mexico 1970.
177. Walker J. The hydrostatic paradox: simple geometries, explicit calculations. The Physics Teacher, Vol. 36, September 1998, pp. 378-379.
178. Ramirez Mercedez, Fabricio Garelli, Ariel Dominguez, Modesto Angulo. Simulacion de un algoritmo para controlar el nivel en tolva ante la alimentacion discontinua de caña. Revista iberoamericana de automatica e informatica industrial, Vol. 6 № 3, Julio 2009, pp. 54-60.
179. Williams, J.R. and O'Connor, R., Discrete Element Simulation and the Contact Problem, Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 6, 4, 279—304, 1999
180. Williams, J.R. and Pentland, A.P., "Superquadric and Modal Dynamics for Discrete Elements in Concurrent Design, " National Science Foundation Sponsored 1st U.S. Conference of Discrete Element Methods, Golden, CO, October 19-20, 1989.
181. Williams, J.R., Hocking, G., and Mustoe, G.G.W., "The Theoretical Basis of the Discrete Element Method, " NUMETA 1985, Numerical Methods of Engineering, Theory and Applications, A.A. Balkema, Rotterdam, January 1985
182. Wilson A. The hydrostatic paradox. The Physics Teacher, Vol. 33, November 1995, pp. 538-539.
183. Anderson K.L., Blankenship G.I., Lebow G. A rule-based adaptive PID controller : Proc. 27th IEEE Conf. Decision. Control, 1988. – P. 564–569.
184. Nesler C.G. Experiences in applying adaptive control to thermal processes in buildings : Proc. Amer. Control Conf., Boston, MA, 1985. – P. 1535–1540

185. Ramos A., M.M.; Castaño C., J.J. Almacenamiento de café tostado y molido en atmosferas de nitrogeno y gas carbonico. *Cenicafe* 55(1): 5-15.2004
186. 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.
187. 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.
188. 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.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение П1

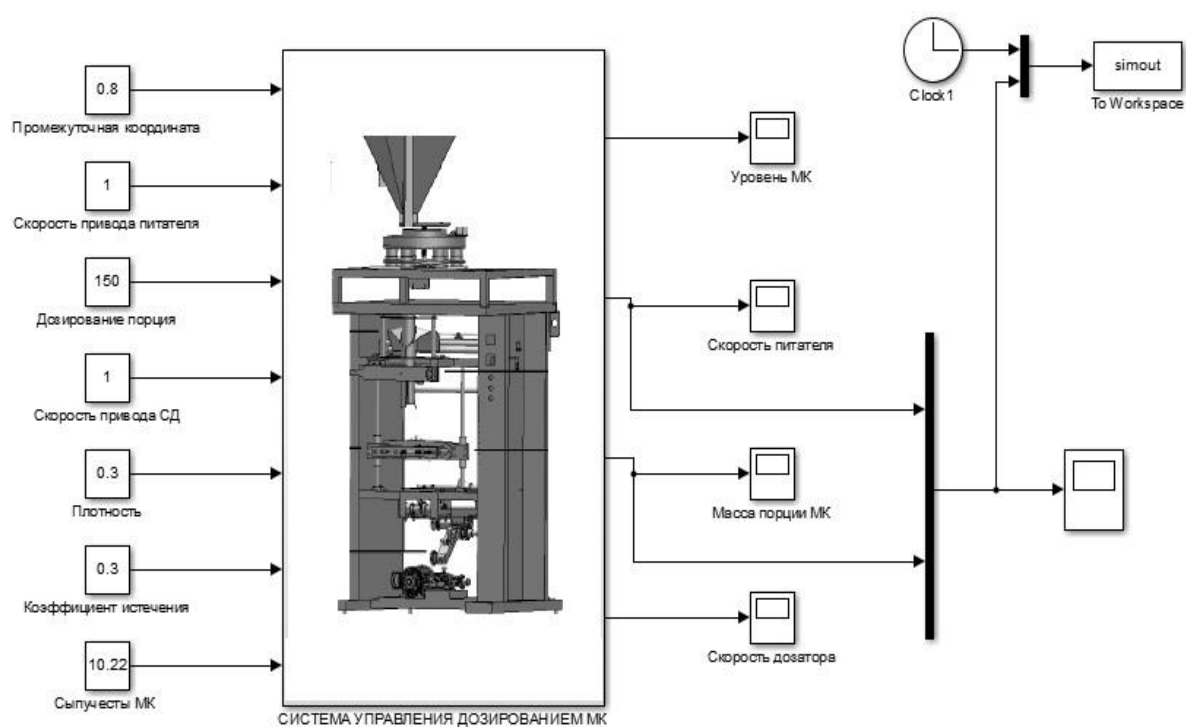


Рис. П1.1. Имитационная модель процесса ДМК в приложении Simulink из пакета MATLAB

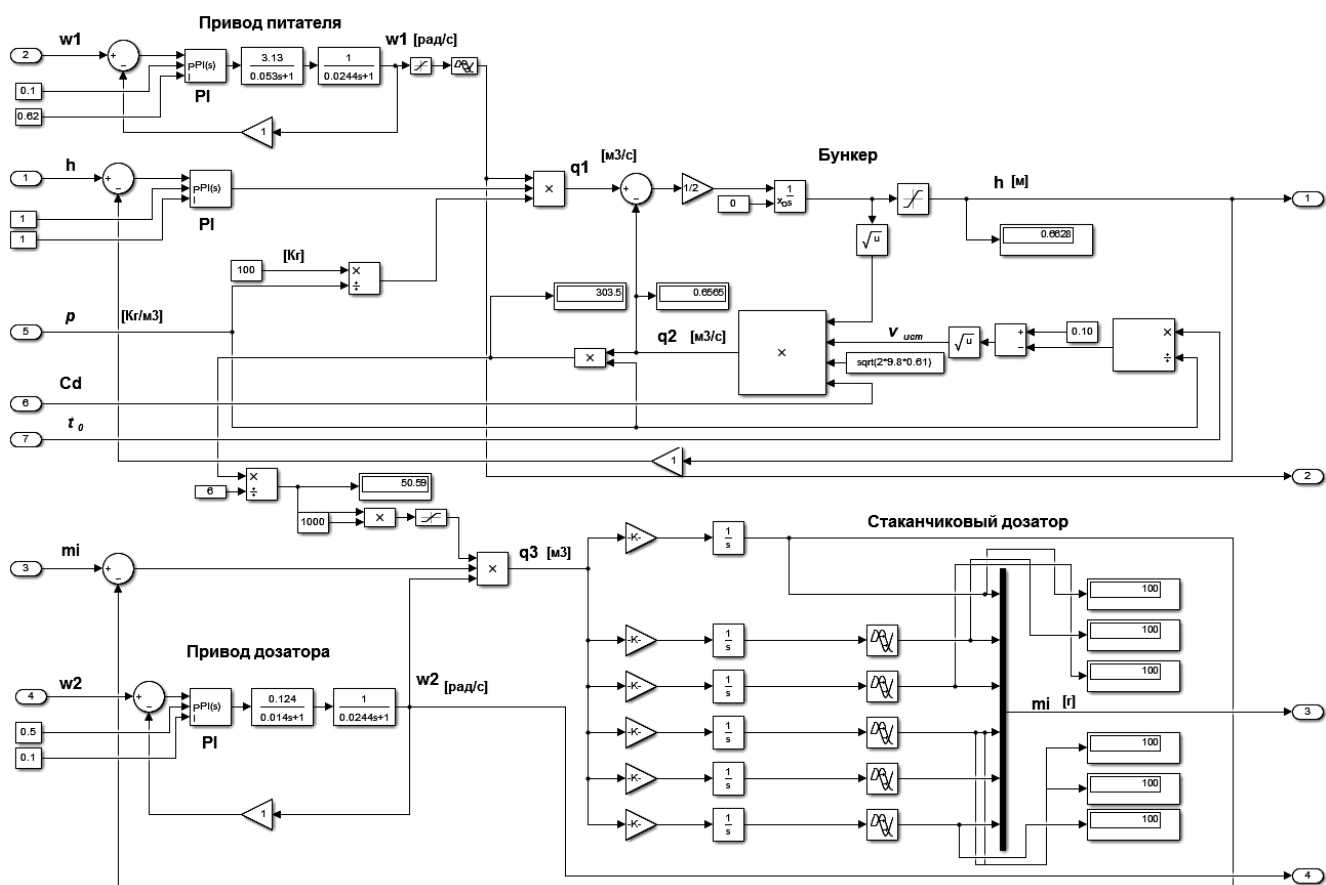


Рис. П1.2. Подсистема — структурная схема имитационной модели процесса ДМК в приложении Simulink из пакета MATLAB

Для разработки нейросетевого оптимизатора ПИ контроллера (рис. П1.3), создается с помощью командой строке (`newff`) в пакете моделирования Matlab 2016a., где выбирается необходимыми качествами функции, архитектур нейронных сетей, алгоритмов обучения и активационных функций.

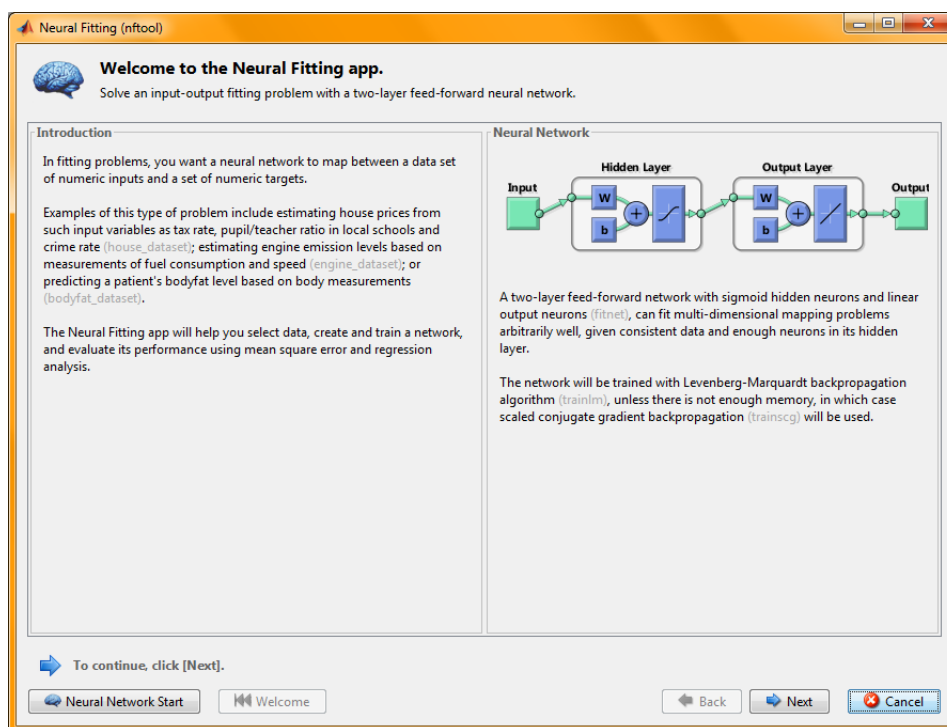


Рис. П1.3. Закладка обучения нейронной сети

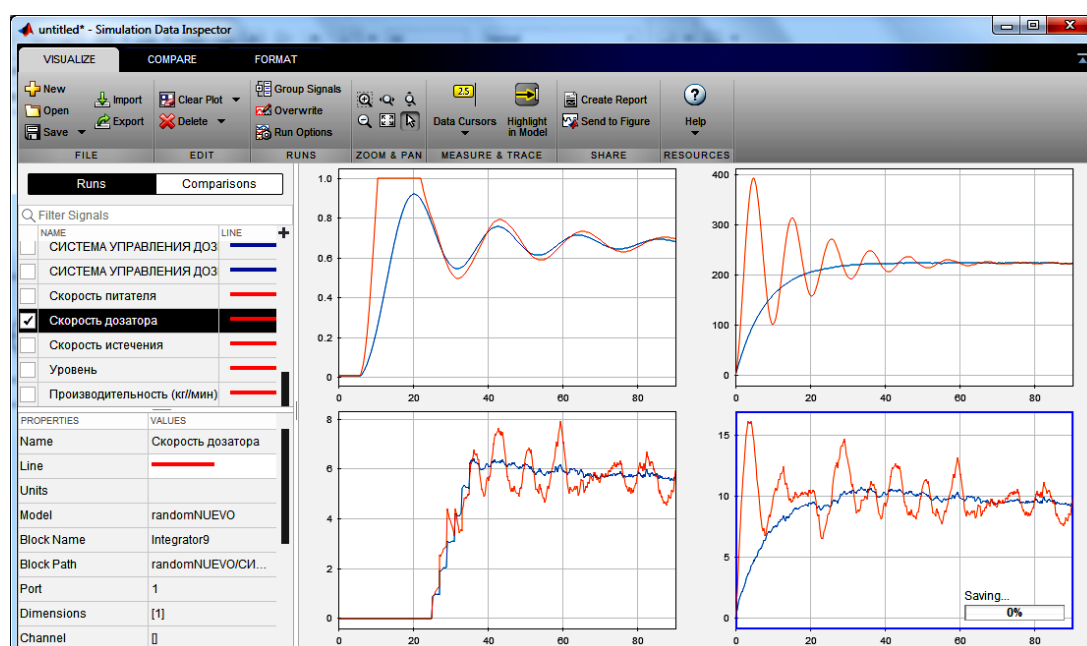


Рис. П1.4. Визуализация результатов симуляции в Simulink из пакета MATLAB (Simulation Data Inspector)

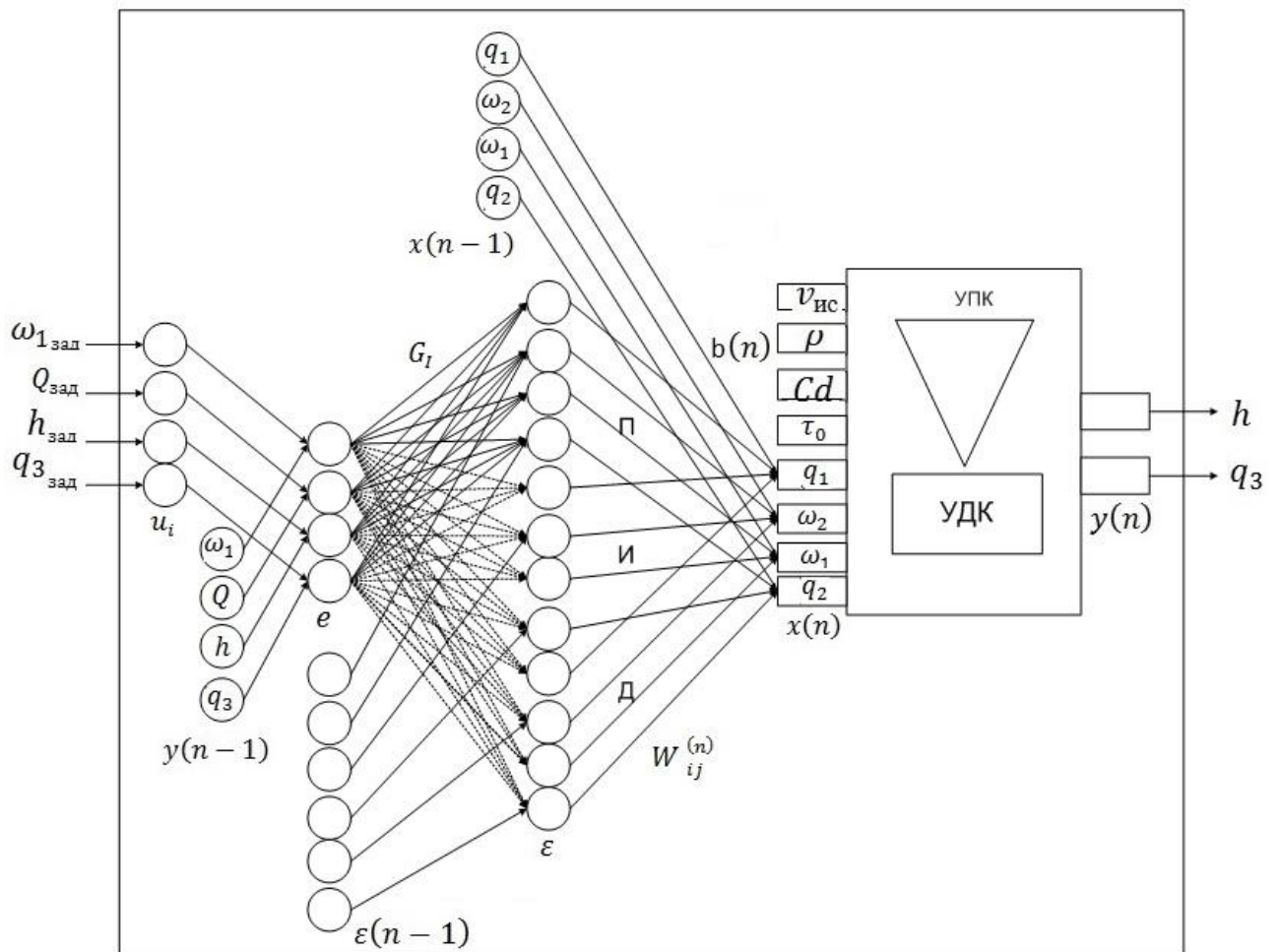


Рис. П2.1. Структура разработанной нейронной сети, типа многослойный персептрон с одним скрытым слоем - ПИД контроллером управления процессом ДМК

Приложение ПЗ

Экспериментальный макет программно-аппаратного комплекса (ПАК) SCADA-система управления технологическим процессом ДМК.

В лицевой панели программно-аппаратного комплекса необходимо ввести параметры физико-механических свойств исследуемого сыпучего материала, заданные значения промежуточной координаты в бункере дозатора, параметры скоростей приводов устройств питателя и стаканчикового дозатора (рис. ПЗ.1). Включаются, электроприводы и наблюдается (мониторинг) регулирование процесса объемного дозирования. При необходимости можно настроить ПИ-контроллер. Отчеты результатов исследования обрабатывается с помощью Microsoft Excel или GraphExpert Professional.

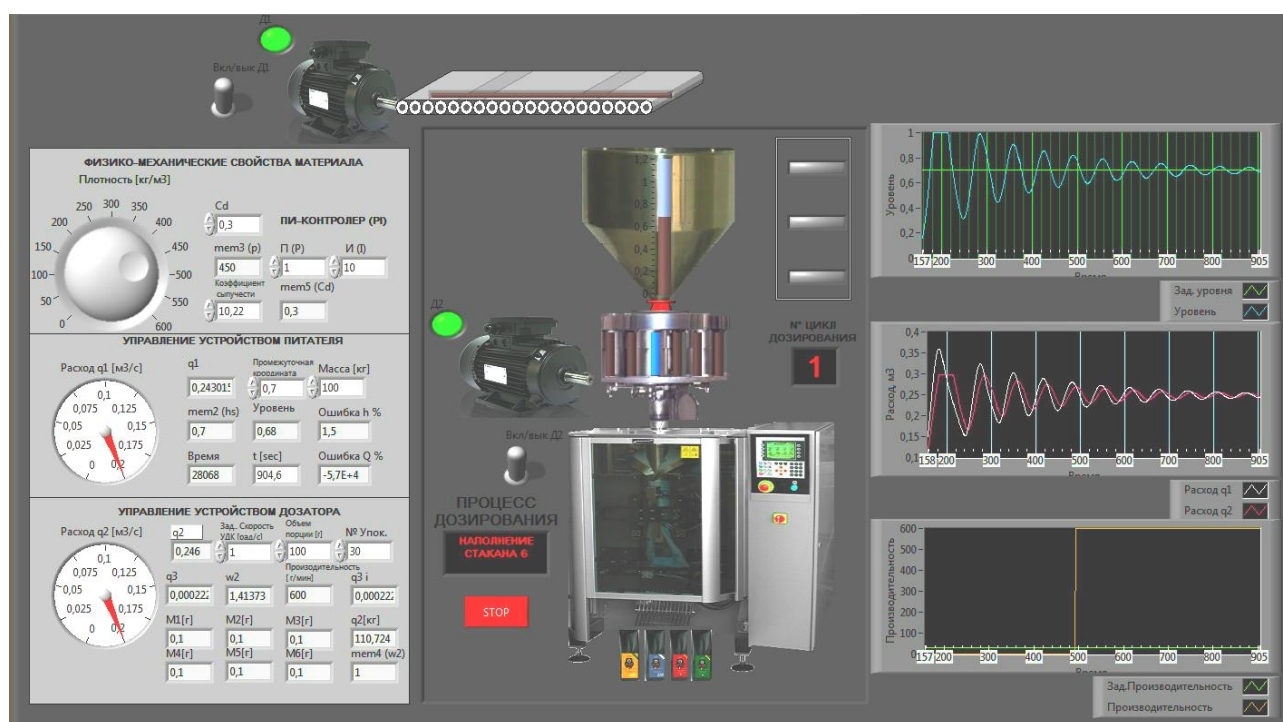


Рис. ПЗ.1. Лицевая панель программно-аппаратного комплекса автоматизированной системы управления процессом дозирования пищевых продуктов

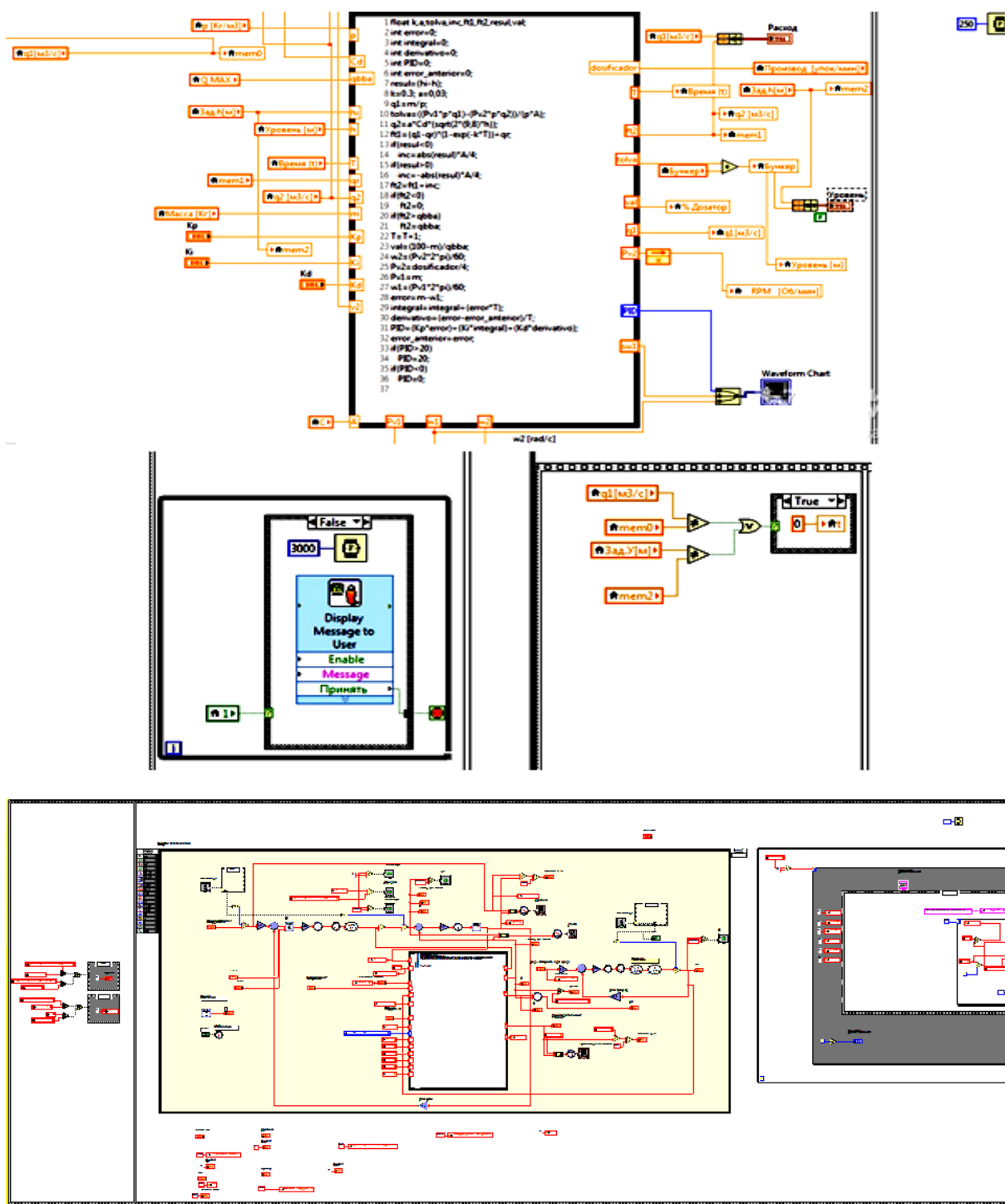


Рис. ПЗ.2. Блоки-диаграммы программно-аппаратного комплекса технологического процесса ДМК разработаны в среде «LabVIEW»

«Утверждаю»
Генеральный директор
ООО «НПП Источник»
Мороз Олег Сергеевич


« 17 » июня 2017 года

**Акт
внедрения результатов диссертационной работы
соискателя Сантос Куннихан Марио Рохелио
в производственном процессе ООО «НПП Источник»**

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы Сантос Куннихан Марио Рохелио «Математическое и алгоритмическое обеспечение системы управления технологическим процессом объемного дозирования при производстве молотого кофе» внедрены в производственный процесс и используются в ООО «НПП Источник», а именно:

1. Математическая имитационная модель процесса дозирования сухих смесей \ сыпучих продуктов, которая позволяет исследовать влияние внешних возмущений. Случайные возмущения как со стороны изменения скорости приводов элементов рабочей системы, так и со стороны изменения физико-механических свойств сухих смесей \ сыпучих продуктов.

2. Алгоритмы работы модуля контроля и регулирования величины уровня сухого продукта (смеси) в бункере объемного дозатора в процессе дозирования и алгоритм нейросетевого оптимизатора, позволяющий найти оптимальные коэффициенты и сократить перерегулирование и время при управлении скоростью движения приводов питателя и дозатора.

3. Лабораторно-экспериментальный макет программно-аппаратного комплекса управления процессом дозирования сухих смесей \ сыпучих продуктов с помощью пакета «National Instruments» в языке графического программирования SCADA LabView, где представлены основные задачи и основные свойства разрабатываемого программного комплекса как контроль, мониторинг и регулирование процессов дозирования для лабораторных исследований сыпучих продуктов.

Результаты диссертационной работы Сантос Куннихан Марио Рохелио используются в производственном процессе аккумуляторных батарей ООО «НПП Источник» при подготовке электролита из щелочей и солей первичных химических продуктов.

Отдельно можно отметить, что результаты диссертационной работы применимы как для химико-технологической отрасли, так и для пищевой промышленности (в частности при производстве молотого кофе), что говорит об универсальных аспектах проделанного диссертационного исследования.

Демин Геннадий Евгеньевич,
Главный технолог ООО «НПП Источник»





**Общество с ограниченной ответственностью
«КОНУС»**

Юридический адрес: 125464, Россия, г. Москва, Пятницкое шоссе, д.16

Тел.: +7 (495) 797-03-74

E-mail: info@asukonus.ru

ИНН 7733743955 КПП 773301001

ОКВЭД 40.10.4

ОКТМО 5367000

«1» ноября 2017г

**Акт использования
результатов работы соискателя
Сантос Куннихан Марио Рохелио в производственном
процессе ООО «КОНУС»**

Настоящим актом подтверждает, что результаты научного исследования соискателя Сантос Куннихан Марио Рохелио, используются при проектировании новых образцов мнемосхемой автоматизированных систем управления технологическим процессом, а также разработке элементов систем их имитационного моделирования.

Система контроля разработанного программно-аппаратного комплекса процесса объемного дозирования пищевых продуктов и сыпучих материалов, способна существовать и как самостоятельная полнофункциональная система контроля, включающая мониторинг объектов контроля, обработку технологических защит, сигнализацию, средства анализа параметров и формирования отчетов. Позволяет управлять процессом дозирования молотого кофе при наличии возмущающих факторов, которые влияют для стабильного и равномерного подачи молотого кофе в дозирующий механизм, чтобы повысить производительность и точность дозирования.

При выполнении работы разработан программно аппаратный комплекс автоматизированной системы управления процессом дозирования сыпучих материалов, на примере молотого обжаренного кофе с помощью пакета «National Instruments LabVIEW», удобный в эксплуатации и значительно сокращающее время проектирования и затраты на предварительные экспериментальные исследования.

Генеральный директор ООО «КОНУС»

Иванов М.Г.

