

На правах рукописи



МАЙТАКОВ АНАТОЛИЙ ЛЕОНИДОВИЧ

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИНТЕЗА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ПРОИЗВОДСТВА
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ
КОНЦЕНТРАТОВ НАПИТКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЛОЧНОЙ
СЫВОРОТКИ**

05.18.12 - Процессы и аппараты пищевых производств
05.18.04 - Технология мясных, молочных и рыбных
продуктов и холодильных производств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Кемерово 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кемеровский государственный университет» (ФГБОУ ВО «КемГУ»)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», г. Кемерово, кафедра «Машины и аппараты технологических систем», заведующий кафедрой
Попов Анатолий Михайлович

Официальные оппоненты: **Панфилов Виктор Александрович**, академик РАН, доктор технических наук, Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», Москва, кафедра «Процессы и аппараты перерабатывающих производств», профессор

Майоров Александр Альбертович, доктор технических наук, профессор, Федеральное бюджетное образовательное учреждение «Федеральный алтайский научный центр агро- биотехнологий», г. Барнаул, Сибирский научно-исследовательский институт сыроделия, главный научный сотрудник

Орешина Марина Николаевна, доктор технических наук, доцент, Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет управления», Москва, кафедра «Информационные системы», доцент

Ведущая организация: Федеральное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления», г. Улан-Удэ

Защита диссертации состоится 11 июня 2021 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.088.11 при ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» по адресу: г. Кемерово, б-р Строителей, 47, 2 лекц. ауд.

Отзывы на автореферат отправлять по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Красная, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» (<https://kemsu.ru/science/dissertation-councils/diss-212-088-11/protects/6441/>)

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Попова Дина Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение продовольственного рынка высококачественными конкурентоспособными пищевыми продуктами функционального назначения на основе местного сырья является одной из приоритетных задач государственной политики в области продовольственной безопасности. Решение продовольственной проблемы в развитых странах мира неразрывно связано с развитием шестого технологического уклада, период которого приходится ориентировочно на 2025-2030 годы. Этот уклад будет характеризоваться применением новых подходов к созданию продовольственных продуктов: внедрение генной инженерии, био - и нано технологий, систем искусственного интеллекта.

Использование местного натурального растительного сырья, а также молочной сыворотки позволяет создать широкий ассортимент напитков. Варьируя рецептурный состав можно получить напитки, обладающими функциональными и лечебно-профилактическими свойствами, что является одной из приоритетных задач нашей страны. Большой вклад в его развитие вносят ученые ведущих научных школ РФ Н. Н. Липатова, А. Г. Храмова, В. Д. Харитонина, Л. А. Остроумова, Л. В. Донченко, В. М. Позняковского, И. С. Хамагаевой, и их учеников и других ученых и специалистов.

Важной задачей является и совершенствование процессов и технологий получения таких продуктов. Решение данной задачи лежит в области создания многофункциональных машин и аппаратов и является предпосылкой для разработки унифицированных технологических потоков. Исследования, проведенные за последние годы, показали, что варьируя физическими свойствами исходного порошкообразного сырья, можно «создать» быстрорастворимые концентраты, отвечающие самым высоким требованиям качества.

Научную основу теории по разработке и созданию быстрорастворимых (в зарубежных источниках – «инстант») продуктов составила теория физико-химической механики дисперсных систем. Автором создания данной теории, «находящейся» на стыке нескольких отдельных разделов молекулярной физики, физической и коллоидной химии, является академик П. А. Ребиндер. Работы академика П. А. Ребиндера послужили основой в области создания и практического внедрения дисперсных систем с заранее заданными параметрами качества и свойствами.

В основу данной научной отрасли положен системный анализ, оптимизация свойств исходных компонентов смесей, влияния тепловых, физико-механических и физико-химических факторов на характер протекающих технологических процессов и их синергетического влияния на формирование качества готового продукта. Продукты питания, получаемые методом гранулирования, являются сложной системой с изменяющимися параметрами и нечеткими причинно-следственными связями.

Производство таких технологических потоков, как отмечает академик В. А. Панфилов, невозможно без организации сложных технологических систем, без их моделирования в условиях информационной неопределенности синергизма параметров процессов и компонентов.

Таким образом, насущной задачей, решение которой в условиях информационной неопределенности (несмотря на значительный объем имеющихся данных, полученных, в основном, экспериментальным путём) сможет обеспечить повышение качества выпускаемой продукции, является, разработка и применение методов системного анализа сложных объектов исследования, обработка информации, разработка программ, алгоритмов и математиче-

ских моделей проектирования новых и оптимизации существующих технологий, а также совершенствование управления технологическими процессами.

В основу данной диссертационной работы легли следующие документы: «Основы государственной политики Российской Федерации в области здорового питания населения на период до 2020 года» (распоряжение Правительства российской Федерации от 25 октября 2010 года N 1873-р); программа «К здоровью через питание», имеющая статус губернаторской программы. В диссертационной работе обобщены результаты теоретических расчетов и моделирования процессов гранулирования, экспериментальных разработок, а также решения прикладных проблем по разработке технологических процессов для производства гранулированных напитков. Обобщение результатов исследований, выводы и заключение являются результатом работы лично автора, либо проводились под его руководством и при его участии.

Степень разработанности темы исследования. Научную основу теории по разработке и созданию быстрорастворимых (в зарубежных источниках – «инстант») продуктов составила теория физико-химической механики дисперсных систем. Автором создания данной теории, «находящейся» на стыке нескольких отдельных разделов молекулярной физики, физической и коллоидной химии, является академик П. А. Ребиндер. Работы академика П. А. Ребиндера послужили основой в области создания и практического внедрения дисперсных систем с заранее заданными параметрами качества и свойствами. Среди учёных, внёсших значительный вклад в исследования в данной области, необходимо отметить таких учёных как М. П. Волярович, А. В. Лыков, Н. В. Михайлов, В. И. Лихтман, Е. Д. Щукин, Н. Б. Урьев, Н. Н. Крутицкий, Б. В. Дерягин, А. Д. Зимон, А. А. Трапезников, И. Н. Владовеца, Ю. С. Липатов, Ф. Д. Овчаренко, И. В. Крагельский. Применение данной теории к материалам, используемым в пищевой промышленности, посвящены работы В. Д. Харитонов, Н. Н. Липатова, А. В. Горбатова, И. А. Рогова, А. Ю. Просекова, А. М. Попова. Особенность данной отрасли науки состоит в оптимальном комплексном анализе механических воздействий, а также влиянии физико-химических и тепловых факторов на протекающие процессы.

Вместе с тем анализ опубликованных научных работ в рассматриваемых направлениях науки свидетельствует о том, что производство порошкообразных смесей в России сдерживается отсутствием эффективных технологий производств конечных форм препаратов и современного аппаратного оформления технологических процессов. Лимитирующей стадией является получение сыпучего продукта в агломерированной форме.

В связи с этим разработка научно-практического обеспечения процессов получения быстрорастворимых напитков и создание промышленного оборудования для их эффективной и экономичной реализации представляет собой крупную и актуальную проблему, имеющую важное народнохозяйственное значение в области производства пищевых продуктов общего и функционального назначения.

Цель и задачи исследований. Настоящая диссертационная работа имеет своей целью создание инновационных подходов к синтезу технологических потоков, методов моделирования, средств и методов проектирования и создания технологических процессов производства быстрорастворимых многокомпонентных полидисперсных гранулированных сывороткосодержащих напитков с заданными показателями качества.

Для реализации поставленной цели решены следующие основные задачи:

- по результатам литературного обзора провести экспериментальные исследования технологических свойств быстрорастворимых напитков, и на основе систематизации полученных данных сформулировать теоретические предпосылки и рабочие гипотезы по применению способов гранулирования и сушки и их оптимизации применительно к производству быстрорастворимых напитков, содержащих в своем составе молочную сыворотку. Оценить степень влияния на качество напитков дисперсного и компонентного состава смесей. Создать

методологические основы исследования и совершенствования систем направленного структурирования быстрорастворимых сывороткосодержащих напитков;

- исследовать процесс влажного структурообразования многокомпонентных сывороткосодержащих полидисперсных систем, оценить изменение пластической прочности, связности гранулы в процессе её формообразования и уплотнения во взаимодействии твердой, жидкой и газообразной фаз;

- исследовать физико-химические свойства сывороткосодержащих дисперсных систем, оценить их энергетические и структурные характеристики и разработать простые, универсальные параметры и показатели для количественной оценки процессов структурообразования в динамике, в процессе формирования гранулы;

- оценить влияние концентрационного фактора на процесс структурообразования и свойства влажных дисперсных систем и установить взаимосвязь между структурно-механическими и водно-физическими свойствами;

- исследовать закономерности перевода коагуляционных структур с молочной сывороткой в конденсационные при сушке и установить взаимосвязь структурно-фазовых и теплофизических характеристик влажных материалов, в том числе с использованием влагоёмких сред;

- систематизировать полученные данные и на их основе сформулировать теоретические предпосылки и рабочие гипотезы по выбору способов гранулирования и сушки в производстве быстрорастворимых плодово-ягодных напитков, содержащих сухую молочную сыворотку;

- исследовать технологические свойства быстрорастворимых сывороткосодержащих напитков и создать методологические основы исследования и совершенствования систем направленного структурирования быстрорастворимых плодово-ягодных напитков содержащих молочную сыворотку;

- оценить этапы формирования структуры гранулы, её физико-химических и физико-механических свойств, выявить поэтапные контролируемые параметры, характеризующие качество и разработать математическую модель процесса структурообразования для оптимизации режимно-конструктивных параметров формования многокомпонентных сывороткосодержащих полидисперсных смесей в процессе их коагуляции при гранулировании окатыванием в тарельчатых грануляторах с активатором;

- разработать логику построения информационных моделей технологических блоков на базе знания закономерностей взаимодействия трех систем – среда, технологические воздействия, процессы и сформировать виртуальную информационную модель оптимизации технологического потока формообразования гранул сывороткосодержащих напитков и определить основные принципы разработки их построения;

- разработать новую концепцию и создать алгоритм и программу работы информационной модели технологического блока (технологического потока), методологию его синтеза;

- реализовать результаты исследований в разработке технологий быстрорастворимых плодово-ягодных напитков на основе молочной сыворотки;

- определить основные направления развития моделей формирования технологических систем производства быстрорастворимых сывороткосодержащих напитков;

- апробировать, протестировать и внедрить основные результаты на предприятиях отрасли.

Научная концепция. В настоящее время сформирован определенный, достаточно высокий уровень знаний о предметной области. Однако отсутствие системного подхода к исследованию механизмов процесса структурирования дисперсной системы, а также неопределенность единых критериальных оценок, позволяющих описать свойства дисперсной систе-

мы на всех этапах технологического процесса ее производства снижает эффективность использования накопленных данных с целью управления процессами структурообразования.

Использование методологии системного подхода позволит объединить результаты исследования процессов образования дисперсных систем, полученных в теории прессования, пластического формования, сушки, запекания, гидратации и твердения вязущих систем. Каждая из этих теории изучает дисперсные системы обособленно, но рассматривает зависимость их структурных свойств и характеристик от геометрии частиц, опираясь на них при построении математических моделей

Научная новизна

1. На основе проведенного комплекса теоретических и экспериментальных исследований установлены основные физико-химические закономерности в технологии производства сухих быстрорастворимых гранулированных концентратов плодово-ягодных напитков на основе молочной сыворотки. Сформулирована концепция управляемого формирования структуры быстрорастворимых полидисперсных сывороткосодержащих напитков, представляющая технологию как систему физико-химических, физико-механических процессов, обеспечивающих формирование заданных показателей качества продукта на всех этапах технологического потока.

2. Обоснован принцип и система количественной оценки непрерывного процесса формирования структуры в технологии полидисперсных гранулированных сывороткосодержащих напитков на основе полидисперсных систем с использованием объёмных фазовых характеристик, критериев и параметров, отображающих наиболее общие признаки дисперсной системы, независимо от её разновидности, типа структуры, технологической стадии и вида энергетического воздействия.

3. Обоснован принцип оценки способности к формообразованию гранулированием дисперсных сывороткосодержащих многокомпонентных смесей на основе анализа их фильтрационных и реологических свойств.

4. Обоснован принцип управления процессами пластического формования пищевых полидисперсных масс при гранулировании и в процессе конденсационно-кристаллизационного переходов при сушке.

5. Обоснован новый методологический подход при исследовании состава и свойств дисперсных структур, учитывающий объёмный фазовый состав этих структур в начальном, текущем и конечном состояниях.

6. Синтезирована типовая технология и технологический поток производства сывороткосодержащих концентратов инстант-напитков с заданными параметрами качества.

7. Разработана математическая модель кинетики процесса структурообразования, обеспечивающая оптимальное управление процессом гранулирования методом окатывания инстантированных дисперсных смесей в тарельчатых грануляторах с активатором.

8. Обоснована методика и логика обеспечения заданных параметров качества функциональных элементов технологического потока гранулированных напитков путём построения информационных моделей технологических блоков на базе знания закономерностей взаимодействия трех систем – среда, технологические воздействия, процессы, с целью их оптимизации. Разработана информационная математическая модель технологического блока, на базе которой создана методика выбора оптимального способа гранулирования, исходя из конкретных технологий производства и аппаратурного и процессового оформления подсистем технологического потока.

Теоретическая и практическая значимость работы. В результате теоретических и экспериментальных исследований сформулированы специальные требования к процессам и оборудованию для производства быстрорастворимых напитков из плодово-ягодного сырья на

основе молочной сыворотки, учитывающие физико-химические и физико-механические свойства дисперсных систем на всех стадиях их структурообразования. На этой основе разработаны: технология гранулирования и сушки многокомпонентных смесей быстрорастворимых структурированных концентратов напитков, являющихся базовыми для создания напитков функционального назначения; технические условия и технологические инструкции: «Завтрак гранулированный на основе молочной сыворотки». Технические условия (с изменениями и дополнениями) - ТУ 9196-001-16362254-19; технологическая инструкция по производству завтрака гранулированного на основе молочной сыворотки; «Кисели плодово-ягодные, быстрорастворимые, гранулированные». Технические условия (с изменениями и дополнениями) - ТУ 9195-001-16362254-19; технологическая инструкция по производству киселей плодово-ягодных быстрорастворимых, гранулированных.

Разработанные технологии апробированы, протестированы и внедрены на предприятиях: АО Финансовая агропромышленная корпорация «Туймаада» (Республика Саха (Якутия)), ООО НПО «Здоровое питание» (г. Кемерово), ООО «Химпром» (г. Кемерово), ООО «Биоцен» (г. Томск) (Приложения Б, Ж, З, И).

Методология и методы исследования. Методологической основой проводимых в диссертации исследований является математическое моделирование, основанное на принципах и методологии системного анализа, системном, энергетическом и информационно-алгоритмическом причинно-следственном подходах; комплексные исследования, сочетающие моделирование, теоретические и экспериментальные исследования.

Результаты экспериментальных исследований получены с применением современных лабораторных методов (физико-механических, физико-химических, технологических, микробиологических, химических) с накоплением статистической информации и ее последующей обработкой с использованием проверенных методик и современного программного обеспечения.

При проведении экспериментальных исследований было учтено, что свойства изучаемых систем находятся под влиянием внешних факторов. Поэтому особое внимание уделено исследованиям динамики физико-механических и физико-химических свойств исследуемого продукта на протяжении всего технологического процесса.

Положения, выносимые на защиту

1. Методология интегрированного проектирования гибких технологических потоков производства быстрорастворимых гранулированных продуктов на основе информационных моделей модулей (подсистем) с учетом взаимодействия среды, технологических воздействий и технологических операций.

2. Результаты экспериментальных исследований:

- влияния технологических факторов на процесс формирования полидисперсных гранулированных продуктов на основе молочной сыворотки;
- процесса структурообразования многокомпонентных сывороткосодержащих гранулированных продуктов;
- особенностей структурообразования гранул, содержащих сыворотку;
- структурно-механических свойств гранулированной сыворотки и сывороткосодержащих композиций;
- структуры гранулы при сушке;
- диагностирования технологии через параметр качества–восстанавливаемость;
- состава, свойств, пищевой ценности сухой гранулированной сыворотки.

3. Математическая модель процесса синтеза технологического потока производства сухих структурированных сывороткосодержащих продуктов и её параметрическая идентификация.

4. Результаты исследования допустимых областей изменения параметров сырья, технологических переменных и коэффициентов математических моделей технологических потоков, математического моделирования и синтеза технологических потоков в условиях неопределенности исходных данных.

5. Перспективные методологии проектирования гибких технологических потоков на основе информационных моделей технологических блоков.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности результатов работы подтверждается 3–5-кратной повторностью экспериментов с применением стандартных методов исследований; использованием современных поверенных приборов и оборудования, имеющих установленные пределы отклонений; полученными данными со статистически достоверными различиями ($p < 0,05$), применением оригинальных и стандартных программ и современного программного обеспечения.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и национальных научно-практических конференциях и семинарах (Брянск, 2007), (Санкт-Петербург, 2008, 2009, 2017, 2018, 2019), (Кемерово, 2009, 2018, 2019, 2020), (Новосибирск, 2010), (Республика Чехия, Прага, 2012), (Республика Польша, Перемышль, 2012), (США, Южная Каролина, Северный Чарльстон, 2018),

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 53 печатных работы, в том числе 5 статей – в международных изданиях, входящих в наукометрические базы данных Scopus и Web of Science, 15 статей – в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ; 3 монографии. Получены 2 патента РФ на изобретение, зарегистрированы 2 программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация включает введение, 8 глав, заключение и выводы, список литературы и 6 приложений. Диссертация изложена на 438 страницах, содержит 106 таблиц, 74 рисунка. Библиография включает 381 литературный источник отечественных и зарубежных авторов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность изучаемой проблемы, сформулированы цель и задачи работы, её концепция и научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Аналитический обзор» представлен анализ научно-технической литературы, связанной с теоретическими и практическими аспектами рассматриваемых проблем. Проведен анализ использования молочной сыворотки, как белково-углеводного сырья, описан химический состав, свойства и специфические особенности сыворотки, как сырья для гранулированных инстант-напитков. Проведён системный анализ технологических процессов производства гранулированных продуктов: механизмы и основные закономерности, технология, аппаратное оформление. Рассмотрены вопросы эволюционного развития представлений о моделировании в производстве многокомпонентных полидисперсных гранулированных концентратов напитков. Дан анализ возможности разработки и использования современных методов моделирования для проектирования новых технологий производства в условиях поливариантности принимаемых решений.

Приведен анализ методов оценки энергетических и структурных параметров пищевых полидисперсных систем.

Во второй главе приведена методология анализа и синтеза технологических потоков производства полидисперсных гранулированных концентратов напитков. Данная методология системных исследований была разработана с учётом нового научного направления – системологии предприятий агропромышленного комплекса, связанных с переработкой. Приве-

дены понятия и определения системологии, а также обоснование системности производства быстрорастворимых гранулированных напитков.

Модель технологической системы может быть представлена в различных вариациях. Например, известна вербальная модель, которая представляет исследуемую технологическую систему в виде структурной или машинно-аппаратной схемы со словесным пояснением отображенных процессов. Также широко применима математическая модель, отображающая процессы, происходящие в технологической системе, в виде аналитических зависимостей. Была выбрана операторная модель, которая позволяет отобразить строение сложной системы и применить методологию системного подхода для ее анализа и синтеза.

Системный подход позволяет рассмотреть технологический поток как взаимосвязанную динамичную систему, состоящую из элементов, имеющих различную природу, но, тем не менее, образующую органичное единство. Это позволяет вскрыть строение технологического потока, изучить его состав и структуру, установить взаимосвязи элементов и подсистем и перейти от анализа технологического потока к его синтезу.

На рисунке 1 показана проблемно-целевая структура работы.

Аналитическая часть работы			
Аналитический обзор основных методов получения быстрорастворимых продуктов	Особенности технологий производства гранулированных быстрорастворимых многокомпонентных полидисперсных пищевых концентратов (МППК)	Методы и технологии моделирования рецептур и технологических потоков производства специализированных МППК	
Научное обоснование и разработка концепции направленного структурирования быстрорастворимых многокомпонентных полидисперсных продуктов и формирования информационных моделей их технологических блоков			
Система технологий (процессов)		Физико-химическая дисперсная система	
Моделирование технологий и процессов производства	Определение критериев и идентификация элементов технологических блоков	Определение критериев и идентификация элементов гранулы	Показатели качества продукта
Разработка и исследование информационной модели технологических блоков			
Структура технологического блока	Выбор метода технологического обеспечения качества	Формирование виртуальной информационной модели	Оптимизация информационных моделей технологических блоков формообразования гранул
Научное обоснование и разработка рецептур, технологии и товароведных характеристик быстрорастворимых гранулированных концентратов напитков			
Исследование качественных характеристик компонентов рецептуры	Исследование потребительских свойств	Определение регламентируемых показателей качества, пищевой ценности, сроков и режимов хранения	Разработка технологии и технологического потока производства

Рисунок 1 – Схема проведения исследований

Описаны методы и методики проводимых исследований исходного сырья, его физико-химических свойств.

В третьей главе с целью совершенствования технологического потока, проведены исследования, по определению корреляционных зависимостей влияния параметров (факторов) технологического потока на процесс образования гранул концентратов напитков на основе молочной сыворотки.

Формовочные свойства дисперсных (полидисперсных) смесей оцениваются по таким параметрам, как структурно-механические и реологические характеристики, а также корреляция характеристик и влагосодержания гранулируемых смесей, например пластическая плотность, сыпучесть, адгезионные свойства. Под воздействием внешних факторов (особенно механических воздействий) происходит трансформация формовочной смеси «статической» структуры в смесь «динамическую» с измененными фазовыми и структурными свойствами.

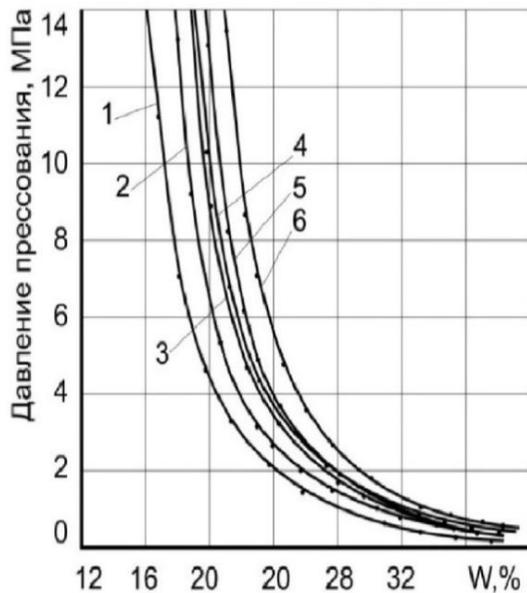


Рисунок 2 – Влияние влажности смесей на удельное давление прессования

большое значение имеет содержание поверхностно активных веществ в виде белковой фракции сыворотки.

Величина $W_{\text{НКВ}}$ характеризует количество влаги для обеспечения связности (поли)дисперсной смеси при критических давлениях прессования. Зависимость $W_{\text{НКВ}}$ от количества влаги бесспорна; так увеличение значения $W_{\text{НКВ}}$ происходит при увеличении количества влаги, требуемой при обеспечении её связности при давлениях, близких к критическим; наличие поверхностно-активных веществ в виде сыворотки обеспечивает еще большую связность.

На рисунке 3 представлена взаимосвязь связности комкуемой массы с величиной $W_{\text{НКВ}}$ и текущим значением её (массы) влагосодержания. Как следует из рисунка, гранулируемые смеси с минимальным или немного большим значением $W_{\text{НКВ}}$ имеют максимальное значение связности. Повышение связности в еще большей степени (при наличии сыворотки (11 %) линии на графике $C=15$ и $C=10$ связность выше). Математически эту взаимосвязь можно выразить как $W_{\text{НКВ}} = C \cdot W_i / (1 + C)$.

Были определены для так называемого «сухого» состояния объёмные концентрации фаз ($K_{\text{Т}}$ – твердой, $K_{\text{Ж}}$ – жидкой и $K_{\text{Г}}$ – газообразной); производились расчёты плотности испытываемых образцов. Полученные данные позволили определить соотношение $(K_{\text{Ж}} + K_{\text{Г}}) / K_{\text{Т}} = (1 - \Pi) / K_{\text{Г}}$, где Π – плотность слоя. Величины газовой, а также газо-жидкостной

Анализируя представленные на рисунке 2 графики зависимости критического давления прессования при изменении влагосодержания можно сказать, что практически для всех испытываемых смесей они одинаковы. Обозначим величину критического давления прессования массы как $P_{\text{кр}}$ (МПа), наименьшую капиллярную влажность как $W_{\text{НКВ}}$ (в относительных единицах), текущее значение влагосодержания массы как W_i , коэффициент, учитывающий содержание концентрированной сыворотки как $k_{\text{п}}$, данное критическое давление с погрешностью 10–12% может быть описано уравнением

$$P_{\text{кр}} = 33,3 \cdot \frac{W_{\text{НКВ}}}{W_i - W_{\text{НКВ}}} \cdot \frac{1}{W_i} \cdot k_{\text{л}} \quad (1)$$

Критическое давление прессования, как видно из приведённого уравнения, предопределяется соотношением капиллярно-неподвижной к капиллярно-подвижной влаге, но в то же время

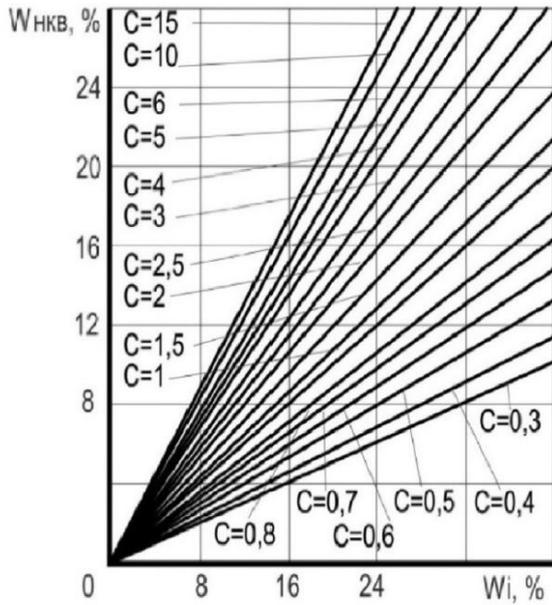


Рисунок 3 – Взаимосвязь связности массы с наименьшей капиллярной влажностью текущим значением её влагосодержания

смеси, а также критическим давлением сжатия системы;

– в случае $(K_{ж} + K_{г})/K_{т} = 1$ или $d_{т}/d_{ч} = 1$ наблюдается трансформация рассматриваемых дисперсных систем в концентрированные суспензии, которые подвержены деформации, обусловленной силой тяжести;

прослойк, находящимися между частицами гранулируемой смеси, можно определить, зная величину удельной поверхности S_v при учете соотношения $(K_{ж} + K_{г})/K_{т}$.

В таблице 1 приведены расчетно-экспериментальные свойства исследованных смесей. Проанализировав полученные данные, можно отметить несколько особенностей, имеющих место в результате уплотнения сухой смеси после увлажнения:

– в случае, если капиллярная влажность увлажненной смеси близка к минимальной, то концентрация твердой фазы в этом случае, максимальна;

– если капиллярная влажность увлажненной смеси минимальна, минимально и присутствие газообразной фазы, что обусловлено наличием развитой структуры гидратных оболочек, покрывающих поверхность частиц твердой фазы

Таблица 1 – Расчетно – экспериментальные свойства исследованных материалов

W_i отн. ед	$P_{пресс}$, МПа	$P_{вль}$, кГ/м ³	$P_{тв}$, кГ/м ³	$K_{т}$	$K_{ж}$	$K_{г}$	$\frac{K_{ж}+K_{г}}{K_{т}}$	$\left(\frac{K_{ж}+K_{г}}{K_{т}}\right)^{1/2}$	S_v , мм ² /мм ³	$\delta_{шл} \times 10^{-7}$, м
0,158	16,50	2047	1768	0,716716	0,279279	0,005005	0,396	0,734	486.2	8,14
0,181	7,00	2012	1704	0,69690	0,308308	0,002002	0,449	0,765	468.6	9,58
0,198	4,60	1976	1650	0,67670	0,327327	0,003003	0,492	0,789	455.1	10,81
0,218	3,38	1936	1590	0,644644	0,347347	0,009009	0,552	0,820	437.2	12,62
0,238	2,34	1891	1530	0,62620	0,361361	0,019019	0,613	0,849	420.7	14,57
0,252	1,70	1845	1474	0,597597	0,372372	0,031031	0,675	0,877	405.3	16,65
0,275	1,20	1778	1395	0,565565	0,383383	0,052052	0,770	0,916	383.6	20,07
0,297	0,95	1706	1316	0,533533	0,391391	0,076076	0,870	0,954	361.9	24,04
0,319	0,71	1658	1257	0,509509	0,401401	0,09090	0,965	0,988	345.6	27,92
0,335	0,54	1582	1185	0,48480	0,397397	0,123123	1,080	1,026	325.8	33,15

– величина прослойки, состоящей из газовой и жидкой фаз, достигает $(5 \times 10^{-7}) - (3,3 \times 10^{-6})$,

м.

Представленная на рисунке 4 графическая зависимость между коэффициентом «упаковки» частиц твердой фазы и содержанием влаги в смеси позволяет более наглядно выявить индивидуальность свойств дисперсных смесей.

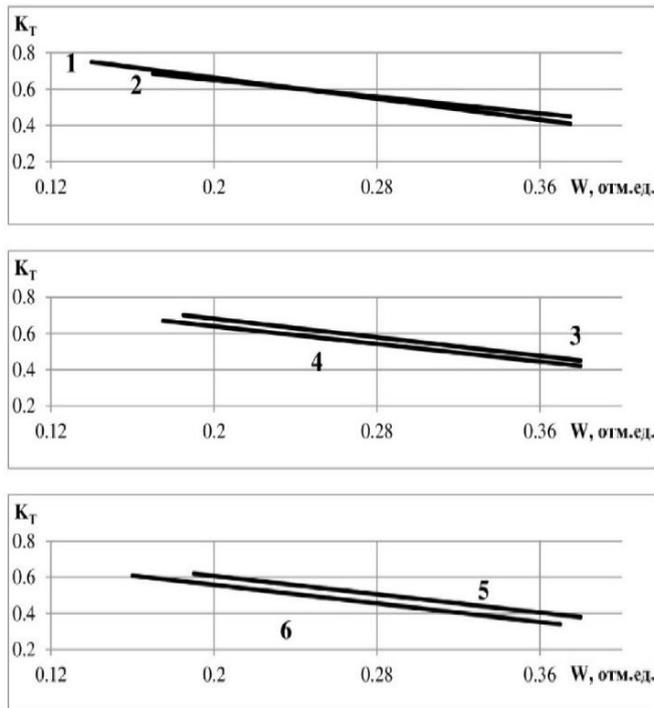


Рисунок 4 – Влияние влагосодержания смесей на процесс уплотнения

$$(1-\Delta W/\Delta K_T=0,734; 2-\Delta W/\Delta K_T=0,936;$$

$$3-\Delta W/\Delta K_T=0,947; 4-\Delta W/\Delta K_T=0,938;$$

$$5-\Delta W/\Delta K_T=0,924; 6-\Delta W/\Delta K_T=0,785;)$$

риала и его склонность к уплотнению может быть оказано за счет изменения содержания поровой влаги гранулы и, соответственно, изменения ее коллоидно-химических свойств. Зависимости на рисунке 4 отражают процесс уплотнения дисперсных материалов, для которых справедливо выражение $(K_{ж}+K_T)/K_T \approx 1$. Влажность материала при таком значении достигает максимального уровня. Она также максимальна в случае равенства единице отношения размеров частиц материала к размерам газожидкостного слоя между ними.

К растительному сырью, как органической системе, представляющей собой совокупность макромолекул, которые (без учета включений твердых минеральных частиц), такое понятие, как «дефект структуры», может быть применимо весьма условно, так как в отличие от твердого тела, имеющего четко выраженную структуру, структура растительного сырья четко выраженных границ раздела не имеет.

Макромолекулы связаны между собой, а также с макромолекулярными структурами, окружающими их, за счет молекулярных водородных связей. Во внутреннем пространстве таких ассоциативных структур и между ними находится жидкая или парогазовая фаза. Структура дефектна, если между макромолекулами отсутствуют молекулярные контакты. В процессе набухания структура, состоящая из макромолекул, приобретает свойства коллоидной суспензии с высоким значением вязкости. Это связано с потерей молекулярного контакта между макромолекулами, что приводит к уменьшению сил сцепления в коагуляционной (компактно-коагуляционной) структуре.

Введем понятие «коэффициент «уплотняемости» $K = \Delta W / \Delta K_T$, позволяющий оценить специфику поведения материала в условиях повышения плотности до критического значения.

Процесс уплотнения частиц гранулята напрямую зависит от соотношения объема каркаса, образованного грубодисперсным материалом, к свободному объему, заполненному поровым веществом.

Суспензия, находящаяся в порах частиц гранулята, обуславливает пластические и влагоудерживающие свойства дисперсного материала в целом. При небольших количествах порового вещества в объеме гранулы дисперсная масса хорошо сжимается под действием внешних усилий, а содержащаяся капиллярная влага при этом легко удаляется из гранул. Таким образом, воздействие на формовочные свойства дисперсного мате-

В коллоидной химии широко используется термин «дисперсия высокомолекулярных соединений» (ДВС). Данный термин также применим для пищевых дисперсных смесей, основной которых является растительное сырье с внесением в него молочной сыворотки. Применительно нашего случая ДВС является открытой многокомпонентной системой, состоящей из нескольких компонентов иерархически распределенных структурных статических элементов системы.

Процесс влажного гранулирования поликомпонентных смесей является процессом сложного взаимодействия трех систем (фаз): твердой, жидкой и газообразной с учетом свойств комкуемого материала. При этом, рассматривая механизм гранулирования применительно к твердой фазе, нельзя не учитывать характеристики и свойства жидкой фазы. Газообразная фаза начинает оказывать влияние на процесс при термическом воздействии на смесь, приводящим к образованию пара. Таким образом, водно-физические свойства гранулируемых материалов являются доминантой, определяющей характер протекания процесса.

Как показали проведенные исследования (что подтверждается и данными литературных источников), на основании физико-механических и физико-химических свойств воды можно говорить о двух группах воды: капиллярно-подвижную ($W_{кпв}$) и капиллярно-неподвижную, ($W_{кпн}$). Вода первой группы может перемещаться в структуре материала в виде жидкости; вода второй группы - в парообразном состоянии.

При образовании прочносвязанной влаги наблюдаются молекулы, которые находятся на поверхности твердого вещества и удерживаются на нем благодаря водородной связи. Данная связь, которая позволяет удерживаться прочносвязанной влаге, имеет значение энергии порядка от 8 до 40 КДж/моль. При этом с целью удаления данного типа влаги необходимо будет создать давление порядка 1000 МПа. В случае влажности $W_i \geq W_{кпв}$ величина жидкостного слоя между частицами дисперсной системы возрастает. В результате этого наблюдается превалирующее значение капиллярных сил в дисперсной системе.

Дисперсная среда обладает свойствами как жидкости, так и твердого тела. При этом структура дисперсной системы может стремиться к какому-либо состоянию в зависимости от структурного каркаса самой дисперсной системы. Дисперсная система может характеризоваться свойствами связи между дисперсной системой и дисперсионной средой.

Одним из показателей, с помощью которых производится оценка степени развития структуры и ее механических свойств, является толщина прослойки между агломерированными частицами, а также через оценку механических свойств высококонцентрированных дисперсных систем, оценивая прочность гранул σ_r , в зависимости от пористости $-П$ и размера частиц $-r$.

Проведенный анализ показал, что наиболее полное представление о механических свойствах увлажненных дисперсных масс может быть получено на основе комплексного показателя – концентрационного (структурного) показателя прочности. Обозначим как $П$ – пористость, Тогда величина $(1 - П)/П = K_T/П = K_T/K_r + K_{ж}$ будет характеризовать данный комплексный показатель.

Гранулометрический состав гранулы является основным фактором, определяющим пористость дисперсных сред. Также он определяет величину объемной концентрации твердой фазы поликомпонентной гранулируемой смеси. Соотношение $K_T/П$ одинаково для дисперсных систем любого качества – тонко- и грубодисперсных. Гидрофильность тонких дисперсий много выше, чем грубых дисперсий, что обусловлено высокой удельной поверхностью тонкодисперсной среды и, как следствие, высокой способностью к образованию в ней единичных контактов. Поэтому использование отношения $K_T/K_{ж}$ $K_T/K_{ж}$ в качестве основного показателя структурной прочности обеспечит более высокую точность результатов оценки механических характеристик увлажненных сред.

Номограмма (рисунок 5) демонстрирует функциональную зависимость количества контактов частиц дисперсного материала от их размеров и содержания в объеме твердой фазы K_T . Количество возможных контактов ν частиц дисперсного материала находится в обратной пропорциональной зависимости относительно квадрата диаметра частиц d : $\nu = 1/m^2 \cdot d^2$.

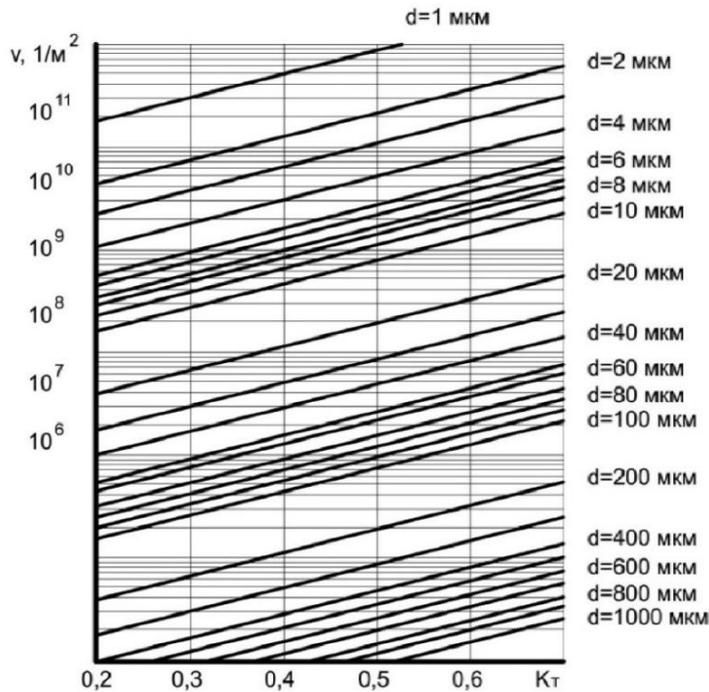


Рисунок 5 – Номограмма определения зависимости числа контактов между частицами от их размера и объемной концентрации твердой фазы

воздействия на соотношение жидкой и твердой фаз дисперсной системы, однородность этих фаз, а также на объемную концентрацию твердой фазы. Рассмотрим основные способы управления процессом формирования дисперсных масс.

1. *Управление за счет изменения соотношения твердой и жидкой фаз и объемной концентрации твердой фазы.* Нормальная формовочная влажность дисперсных масс наблюдается при содержании твердой фазы $K_T = 0,55 - 0,60$. Значение нормальной формовочной влажности может быть определено по перегибу кривой, отражающей влияние влагосодержания на пластическую прочность массы. Толщина слоя жидкой фазы в структуре гранулы продукта при нормальной формовочной влажности составляет от 0,9 до 1,4 мкм. При $V_{НКВ}$ этот показатель не поднимется выше 0,5–0,8 мкм. Чем меньше интервал значений толщины слоя, тем тонкодисперснее исследуемая масса. Повышение степени грубодисперсности каркаса массы обусловлено присутствием в ней капиллярно-подвижной влаги, что также сказывается на снижении сил сцепления частиц друг с другом. Скорость фильтрационного перемещения жидкости снижается в случае повышения ее вязкости. Также скорость можно снизить, воздействуя на влажность дисперсной массы в целом посредством различных ПАВ, например, молочной сыворотки. Использование химических добавок различного состава и свойств можно добиться изменения размера гидратной оболочки жидкой фазы за счет пептизации и коагуляции порового вещества. В таком случае происходит изменение коллоидно-химических свойств дисперсного материала в целом. При этом изменяется соотношение твердой и жидкой фаз, что ведет к изменению механических и реологических свойств дисперсного материала.

Таким образом, можно заключить, что величина $(1/d^2)$ обуславливает количество контактов частиц увлажненного дисперсного материала и определяет его структурную прочность.

Процесс пластического формирования дисперсных масс управляем. Об этом говорят результаты исследований закономерностей процесса деформационного поведения, в том числе процесса перемещения жидкости в системе. Также подробно изучено поведение дисперсной массы в ходе компрессионных испытаний при различной нагрузке. В результате обработки эмпирических данных выявлены зависимости, отражающие общие закономерности процесса формирования дисперсных масс.

Управление процессом формирования осуществляется посредством

2. *Управление за счет изменения однородности дисперсной массы.* Под однородностью, как правило, понимают устойчивую способность среды к сохранению количественного соотношения твердой и жидкой фаз независимо от величины внутренних напряжений, вызванных деформацией. Однородность материала определяется во многом его фильтрационными характеристиками, способностью твердой фазы материала удерживать влагу и наличием капиллярно-подвижной жидкой фазы. То есть соотношение фаз является решающим фактором в данном случае. Следовательно, управление однородностью дисперсной массы должно строиться на основе сохранения постоянства соотношения фаз. Критерием результативности управления служит улучшение формовочных свойств материала.

Выявлены особенности структурообразования гранул, содержащих сыворотку.

Исследование проводилось при использовании в составе увлажняющей жидкости при гранулировании - концентрированной от 20 до 50% молочной сыворотки, а также при введении сухой молочной сыворотки в состав гранулируемой смеси.

Характерной особенностью такой полидисперсной системы является возникновение химических и механических связей, вызванных высокой коагуляционной способностью белков. Кроме того в гранулируемой смеси возникают связи, причина возникновения которых – поверхностное натяжение и капиллярное давление жидкости. Имеющаяся в сухой составе молочной сыворотки лактоза (вследствие кристаллизации растворяющихся веществ) также способствует образованию связей между зародышами гранул.

Как указано выше, комкуемость зависит в основном от свойств поровой суспензии и характера капиллярного взаимодействия частиц, поэтому с целью повышения качества гранул вязкость поровой жидкости необходимо увеличить. Следствием этого является использование концентрата молочной сыворотки в качестве увлажнителя в процессе гранулирования сухого сывороточного порошка. Эмпирически установлено, что содержание сухих компонентов сывороточного концентрата должно находиться на уровне 50%. В этом случае обеспечивается достаточная комкуемость дисперсной среды и прочность гранулы продукта. При этом схема комкования следующая – увлажнение сухого сывороточного порошка, его агломерирование, выдавливание жидкой фазы в верхние слои частицы, налипание, уплотнение и т.д. Особенностью процесса при этом является прерывистое введение в зону гранулирования через форсунку подогретой сыворотки и присутствии в конструкции гранулятора диспергатора-активатора, позволяющего избежать спонтанного агломерирования.

Процесс гранулирования может быть интенсифицирован и доведен до оптимального. Основной способ интенсификации заключается во внедрении в рецептуру производства сухих гранулированных продуктов на основе молочной сыворотки муки из плодово-ягодного сырья. При этом кислотность молочной сыворотки, подвергшейся сгущению, не оказывает влияние на способность дисперсной среды к гранулообразованию. Это обусловлено невысоким ее содержанием – примерно от 6 до 10% влагосодержания для 50% сгущенной сыворотки, а также высокой способностью плодово-ягодного шрота поглощать влагу. При внесении плодово-ягодного шрота в молочную сыворотку с кислотностью 50°Т и 150°Т прочностные свойства гранул, полученных на ее основе, не изменились. Постоянными остались гранулометрический состав гранулята молочной сыворотки, а также производительность технологического оборудования.

Были проведены исследования, позволившие определить структурно-механические свойства гранул молочной сыворотки и сывороткосодержащих напитков.

Комкуемость влажного материала, подвергаемого гранулированию и окатыванию, во многом определяется прочностью получаемого окатыша. Именно комкуемость частиц дисперсной среды оказывает существенное влияние на прочность образующихся агрегатов (рисунк 6) и определяет стабильность процесса гранулирования.

При исследовании выявилось, что структурно-механические свойства сухого гранулята молочной сыворотки зависят от временного фактора. Время выдержки увлажненной дисперсной смеси с момента ее приготовления значительно влияет на пластическую прочность продукта. Данный факт установлен по экспериментальной кривой, представленной на рисунке 6. Прочность уплотненной молочной сыворотки увеличивается со временем. Порошкообразная молочная сыворотка сначала упрочняется, затем затвердевает под действием процессов растворения кристаллов молочного сахара, их последующей перекристаллизации и образования кристаллогидратов. Также данная цепочка процессов обусловлена частичным набуханием белковых веществ, которые выполняют «склеивание» находящихся с ними в контакте твердых частиц. Для сухого гранулята молочной сыворотки оптимальное значение влажности составляет 11%. Для сывороткосодержащих сухих гранулированных продуктов с добавлением плодового сырья оптимальная влажность находится на отметке 13%. Таким образом, влажность при гранулировании молочной сыворотки ограничена узким интервалом от 10,5 до 11,5%.

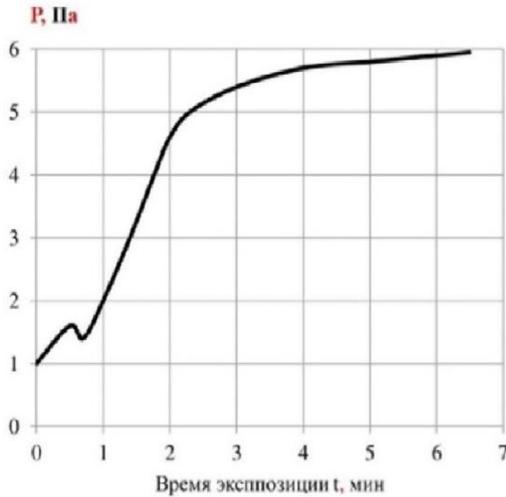


Рисунок 6 – Динамика значений пластической прочности увлажнённой и виброуплотнённой молочной сыворотки

Были проведены исследования процесса формирования структуры гранулы при её сушке. Рассматривая процесс формирования структуры гранулы при сушке, необходимо отметить важную особенность данного процесса, а именно – изменение характеристик высушиваемой системы (гранулы). Эти изменения обусловлены тем обстоятельством, что при воздействии тепла на полидисперсную структуру гранулы происходит её трансформация. Т.е. стационарная структура преобразуется в динамическую. Важная особенность таких структур – соответствие объемной концентрации твердой фазы типу (поли)дисперсной структуры. Содержание фаз влажных гранул, как показали эксперименты: $K_T = 0,735 - 0,780$ – твердая; $K_G = 0,020 - 0,050$ – газовая; $K_{ж} = 0,20 - 0,26$ – жидкая.

Проведенные исследования показали, что для данной дисперсной смеси существует постоянная величина, не зависящая от температуры, при которой осуществляется процесс сушки. Она равна сумме объёмов пор материала после сушки ($V_{пор}$) и его усадки ($V_{ус}$). Соответственно, она равна сумме объёмов жидкой и газовой фаз исходной полидисперсной смеси до начала процесса сушки, т.е. при условии, что $V_{ус} = K_{T2} - K_{T1}$, а $V_{пор} = 1 - K_{T2}$ можно записать: $V_{ус} + V_{пор} = K_{ж1} + K_{Г1} = 1 - K_{T1}$.

Мониторинг методик оценки чувствительности гранулируемых смесей к сушке проводился с помощью энергетического критерия. Данный критерий дает представление о кинетике процесса сушки с учётом, как свойств исходной смеси, так и параметров режима сушки. Проведённые эксперименты дали возможность произвести оценку объёмных изменений влажной исходной смеси, происходящих в процессе влагоудаления, т.е. чувствительность к сушке. Выводы, полученные в результате анализа объёмных изменений влажной исходной смеси: процесс сушки влажного гранулята при температуре равной 20°C приводит к наиболее явным объёмным изменениям структуры, это связано с природой и кинетикой процесса сушки; снижение же объёмных изменений в структуре агломератов наблюдалось при повышении температуры сушильного агента, это может быть связано с температурным градиентом и миграцией влаги внутри гранулы, о данном значении можно судить по K_{T2} ; при существенном

повышении содержания в агломерате твердой фракции (сахарной пудры и крахмала) наблюдается рост объемных изменений в структуре гранулы при ее сушке, а также происходит увеличение содержания газовой фазы в конечном продукте; дисперсный состав напрямую влияет на структурно-механические свойства получаемого гранулята, так при повышении содержания мелкодисперсной фракции до 10 % приводит к росту прочности готового продукта (это связано с повышением адгезионно-когезионных сил внутри гранулы между частицами всех трех фаз); равенство объемов пор и усадки материала, имеющих после сушки и объемов жидкой и газообразной фаз во влажном гранулируемом продукте до удаления из него влаги.

Свойства исследуемой смеси находятся во взаимодействии; одни влияют на другие. Так, например, водно-физические свойства материала определяются теплофизическими и структурно-механическими свойствами. Если проанализировать классические формулы расчёта теплофизических параметров, то видно, что в этих расчетах не принимается во внимание ещё одна важная составляющая, которая должна присутствовать в проводимых расчётах. Это – обладающая наибольшим термическим сопротивлением газовая фаза.

Примем во внимание, что расчеты теплоёмкости ведутся по массе материала. А так как масса прямо пропорциональна объёму влажной смеси, расчёт её теплоёмкости $c_{вл}$ проводится не по массе, а по объёму (объёмным долям). При этом учитываются объёмные доли всех фаз (и их теплоёмкостей: $c_T, c_ж, c_г$ – соответственно твердой, жидкой и газовой фаз) – составляющих полидисперсной смеси: $c_{вл} = c_n K_T + c_ж K_ж + c_г K_г$.

Коэффициент теплопроводности при проведении исследований определялся как соотношение термосопротивления фаз, выраженное через коэффициенты теплопроводности дисперсного материала $\lambda_{вл}$ и фаз $\lambda_T, \lambda_ж, \lambda_г$, коэффициенты a_1, a_2, a_3 в сумме=1-учитывают присутствие K_T всех компонентов смеси. Тогда:

$$\lambda_{вл} = \frac{(K_m + K_{жс}) / (1 - K_m)}{\frac{K_m * \alpha_1}{\lambda_{T1}} + \frac{K_m * \alpha_2}{\lambda_{T2}} + \frac{K_m * \alpha_3}{\lambda_{T3}} + \frac{K_{жс}}{\lambda_{ж}} + \frac{K_г}{\lambda_г}}, \quad (2)$$

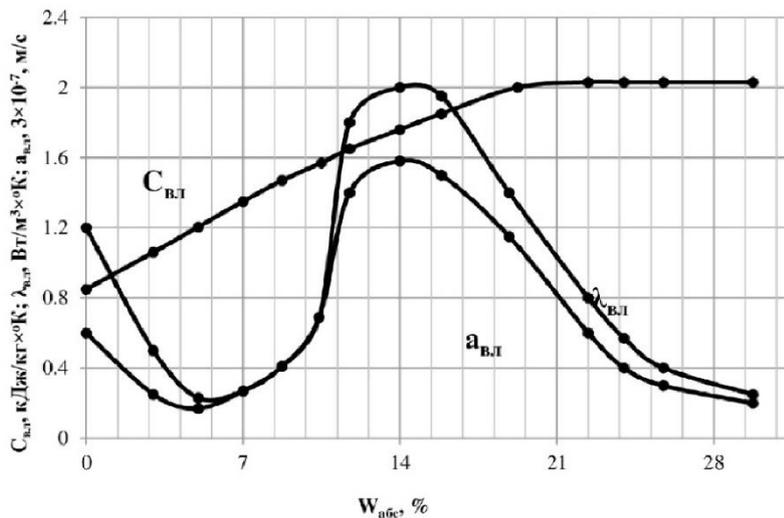


Рисунок 7 – Характер влияния влагосодержания исследуемой смеси на его теплофизические свойства

$W = (11 - 15)\%$ (рисунок 7). Именно этот диапазон имеет $W_{нкв} = 12\%$, т.е. наименьшую капиллярную влажность. Другими словами, в этом диапазоне во всем объёме гранулируемой смеси слой прочносвязанной воды приобретает свойство сплошности; процесс сушки в этом случае в большой степени зависит от воды в таком состоянии.

Расчет коэффициента температуропроводности можно произвести, используя известные значения $c_{вл}$ и $\lambda_{вл}$ и обозначив величину плотности материала как $\rho_{вл}$: $a_{вл} = \lambda_{вл} / c_{вл} * \rho_{вл}$.

Характер влияния влагосодержания исследуемой смеси на его теплофизические свойства показано на рисунке 7. Процентное содержание фракций смеси: шрот / сахар / крахмал – 20 / 60 / 20.

$\lambda_{вл}$ и $\alpha_{вл}$ имеют максимальное значение в диапазоне

Анализ экспериментальных данных показывает, что частицы гранулята молочной сыворотки и смесей на ее основе, размер которых находится в диапазоне от 3 до 3,5 мм, характеризуются равномерно уплотненной структурой по всему объему гранулы. Если в результате процесса гранулирования возникают гранулы большего размера, то их структура имеет внешнюю оболочку – скорлупу, обладающую высокой прочностью и плотностью. Такая оболочка образована, главным образом, в результате процессов связывания высококонцентрированного раствора на поверхности гранулы водорастворимыми белками в процессе сушки и его кристаллизацией. В гранулах продукта на основе молочной сыворотки с добавлением плодово-ягодного сырья имеет место «арматурный» эффект, вызванный присутствием крупнодисперсных фракций шрота ягоды. Гранулы молочной сыворотки, размер которых менее 3,5 мм, характеризуются пониженной прочностью. Это характерно для переходного момента, когда наблюдается разница влажности по сечению агломерата, а именно наблюдается пониженное содержание влаги в поверхностных слоях гранулы по сравнению с внутренней частью.

Таким образом, было установлено, что при исследовании процесса сушки материалов и определения логики волатильности их свойств и структуры применение объемных фазовых характеристик позволяет использовать новые подходы, что, в свою очередь, дает возможность выстроить технологию оптимизации процесса.

Можно резюмировать: в ходе анализа процесса формирования влагосодержащих (поли)дисперсных смесей с заранее устанавливаемыми формой и размерами гранул, их (процессов) прогнозирования, исследовании и оптимизации высокую информационную значимость имеют объемные фазовые характеристики (поли)дисперсных систем. Использование объемных фазовых характеристик, с помощью которых возможно решать задачи автоматизации технологическими потоками, позволяет создавать динамические модели, что, в свою очередь, является основным практическим результатом данного этапа системных исследований. Эти модели будут служить основой проектирования и создания систем машин и аппаратов, как подсистем технологических потоков, для производства структурированных многокомпонентных дисперсных систем продуктов функционального назначения.

В четвертой главе проведен анализ способов гранулирования сухого порошка сыворотки и в композиционной смеси с сахарной пудрой, крахмалом и плодово-ягодной мукой. Высокая степень гигроскопичности и растворимости порошка сухой молочной сыворотки приводит к тому, что в процессе гранулирования на поверхности гранулы возникает высококонцентрированный слой, который затрудняет продвижение жидкости вглубь гранулы. Об этом говорят результаты экспериментальных исследований кинетики капиллярной пропитки. Скорость формирования гранул практически совпадает со скоростью затвердевания порошка сыворотки, подвергаемого увлажнению. Результаты экспериментальных исследований позволили выбрать «сухой» способ гранулирования молочной сыворотки, предполагающий дробное внесение жидкого раствора концентрированной сыворотки.

Для гранулирования сывороткосодержащих напитков выбрана схема по «полумокрому способу» с равномерным внесением жидкой добавки.

Диагностирование технологий проводили через параметр качества - восстанавливаемость (инстантирование). Исследовалось влияние температуры на реологические кривые течения и на вязкость (рисунок 8).

Полученные экспериментальные данные демонстрируют зависимость процесса восстановления (структурообразования) гранулы от температуры. При температурах от 65 до 70 °С скорость набухания крахмала в составе продукта резко возрастает. Эффективная вязкость продукта постепенно возрастает до 85 °С. Но при повышении температуры до 100 °С эффективная вязкость киселя снижается.

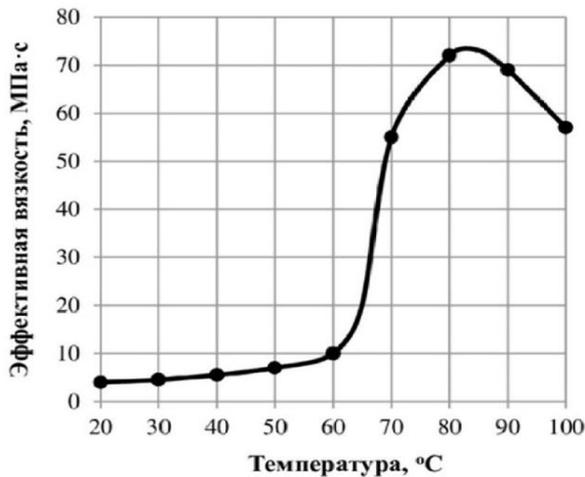


Рисунок 8 – Зависимость эффективной вязкости сухого быстрорастворимого гранулированного черничного киселя от температуры

Таким образом, проведенные на данном этапе исследования позволяют установить оптимальную температуру восстановления быстрорастворимых гранулированных киселей $t_{\text{опт.}}=85^{\circ}\text{C}$.

Исследовано влияние гранулирования на изменение химического состава и физико-химические свойства аминокислотного состава гранулированной сыворотки, и сывороткосодержащих напитков, витаминов и микробиологические показатели в процессе хранения при разных температурах. Полученный продукт успешно хранится как в условиях низких температур (-18°C при относительной влажности воздуха 85% или $+4$ – $+6^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности воздуха 55%), так и комфортных температурах ($+18$ – $+20^{\circ}\text{C}$) в условиях повышенной влажности окружающего воздуха (80%). Продукт остается пригодным для применения в пищевых целях на протяжении двух лет.

В пятой главе на основе проведенного выше анализа процессов формирования разработана типовая технологическая схема (рисунок 9), как части технологического потока, производства полидисперсных многокомпонентных концентратов напитков, имеющих в своём составе молочную сыворотку и плодово-ягодное сырьё.

Разрабатываемые технологии производства продукции (а это физические, физико-химические, химические и биологические технологии), имеющие в основе использование местного сельскохозяйственного сырья, состоят из совокупности более мелких технологических процессов, то есть представляют собой технологический поток. Реалии сегодняшнего дня требуют развития мелкого бизнеса – малых многоассортиментных малотоннажных производств. Среди множества методов, применяемых для исследования таких сложных технологических систем (потоков), особенно эффективным методом, особенно на этапах предпроектного проектирования, является предложенный академиком РАН В. А. Панфиловым системный подход, который включает в себя исследование отдельных процессов в системе (микроисследования), а затем по полученным результатам в рамках отдельного аппарата или машины – макро-исследования.

Разработка технологического потока производства проводится на основании анализа методов формирования гранул по аналогии с уже имеющимися процессами, которые могут быть приняты за прототип

Проведение процесса восстановления при 95 – 100°C , выдержка восстановленного продукта в течение 10 минут с целью стабилизации его консистенции, и затем быстрое охлаждение до 20°C позволяют значительно повысить вязкость киселя почти вдвое. Спустя сутки хранения восстановленного продукта, его вязкость возрастает в 2,5 раза.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований установлено оптимальное значение температуры процесса восстановления быстрорастворимого гранулированного киселя, которое составила 85°C .

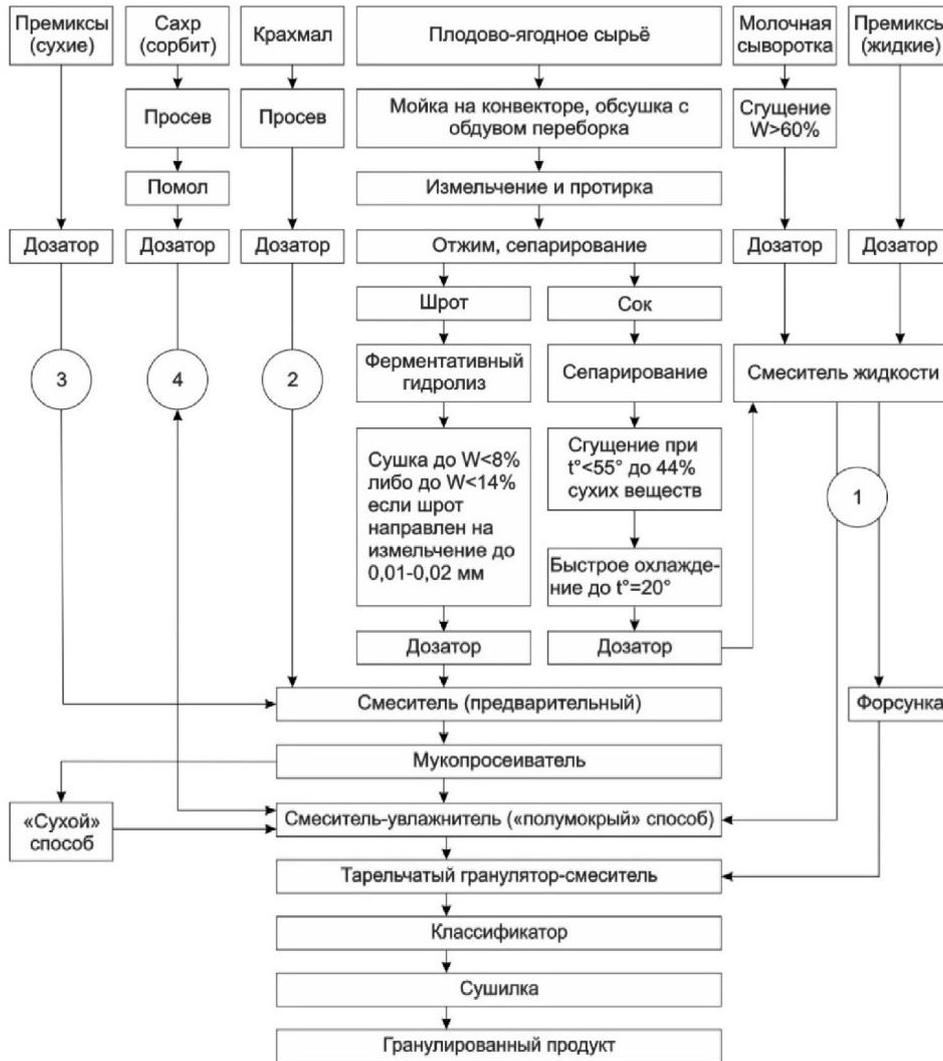


Рисунок 9 – Технологическая схема производства плодово-ягодного киселя на основе молочной сыворотки

Пример такой модульной модели, разработанной с учетом действующих аналогичных технологий производства сухих порошкообразных гранулированных концентратов напитков, представлен на рисунке 10.

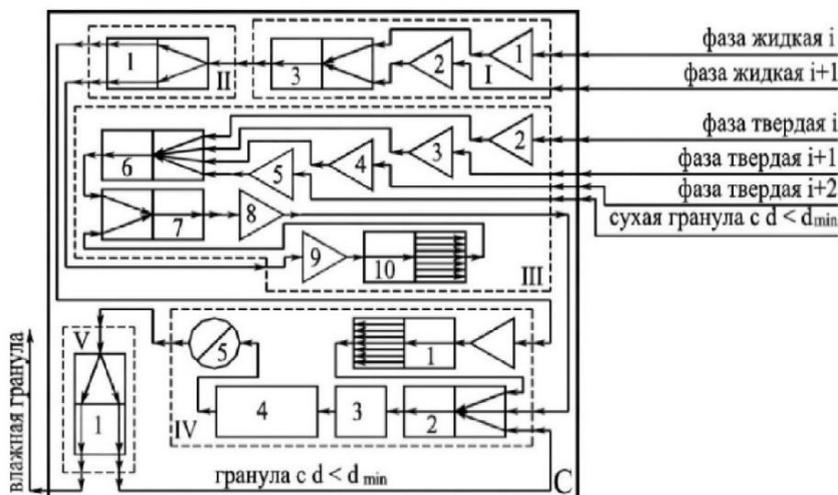


Рисунок 10 – Подсистема формирования гранул

Как видно из представленного рисунка, приведенная, и по своей сути универсальная технологическая схема, является набором типовых технологических процессов, предназначенных для переработки сельскохозяйственной продукции и находящихся во взаимодействии посредством систем машин различного назначения. Варьируя технологические процессы, можно получить процессы, имеющие на

выходе конечный продукт, отличающийся по своим свойствам и функциональному назначению. Так например:

- технологический поток производства сухих гранулированных соков может быть осуществлен при исключении из системы линии подачи крахмала;
- добавляя вместе с крахмалом сухую молочную сыворотку, получим продукт функционального назначения на основе молочной сыворотки;
- заменив сыворотку молоком и исключив плодово-ягодную продукцию, получим молочный кисель и так далее.

Анализ приведенных в диссертационной работе схем технологических потоков производства различных сухих инстантированных продуктов (киселей, соков, десертов и др.) показывает, что доминирующими подсистемами, имеющими вид разветвленных сходящихся потоков, на всех вышеприведенных схемах являются линии (участки) формирования – гранулирования готового продукта. Создаваемые структурные схемы технологических потоков показывают взаимосвязи отдельных подсистем между собой, сырьё или полуфабрикаты, поступающие в подсистемы, конечный продукт на выходе потока. Для каждой подсистемы выбраны режимы процессов и контролируемые параметры. Диагностирование технологии сывороткосодержащих напитков - киселей проводили через параметр, характеризующий качество - восстанавливаемость и потребительские: сохраняемость и органолептика готового продукта.

Таким образом, интегрированный комплекс образующих технологическую систему отдельных операций – это и есть функция технологического потока. Определяющую функцию в технологической системе выполняют процессы и технологические операции, которые выполняются главных подсистемах потока. В этих подсистемах происходит формирование параметров качества конечного продукта, что и является задачей исследований – разработке и реализации технологий создания быстрорастворимых гранулированных продуктов питания.

На рисунке 11 представлена операторная модель такой системы.

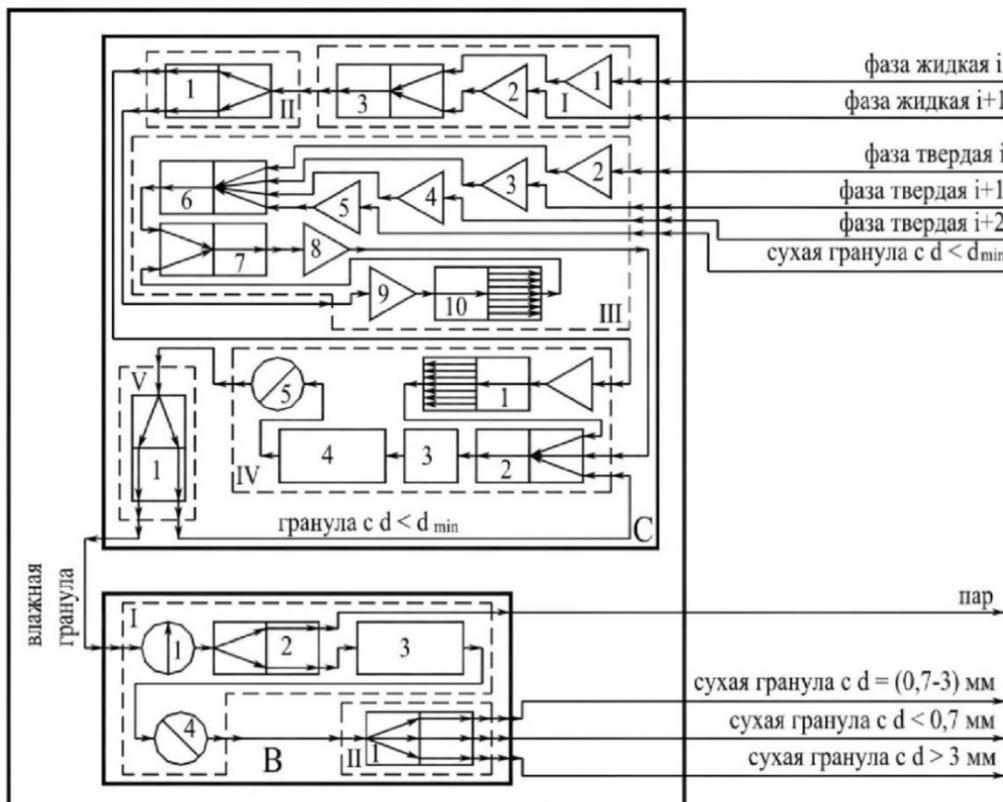


Рисунок 11 – Операторная модель системы формирования быстрорастворимых гранулированных напитков

На основе проведенного анализа структурообразования гранул, операторная модель которой показана на рисунке 11, выявили, переходя от системы процессов к уровню физико-химических систем, что процесс гранулообразования полидисперсных смесей в грануляторах тарельчатого типа проходит в три этапа: первый этап – этап зародышеобразования; второй этап – этап роста гранул; третий этап – этап уплотнения образовавшихся гранул.

Как показали проведенные эксперименты, факторами, определяющими скорость роста гранул, являются фракционный состав исходной смеси, её влагосодержание в заданном объеме, конструктивные параметры и режимы работы используемого гранулятора.

Одним из показателей, характеризующих кинетику и механизм гранулирования полидисперсных смесей, является показатель комкуемости (K). Он определяет способность полидисперсной смеси к окомкованию. На показатель комкуемости оказывают значительное влияние такие факторы, как состав смеси, её гидрофильность и влагосодержание, а также присутствие в смеси коллоидных фракций. Как показывает практика, стабильность работы грануляторов тарельчатого типа обеспечивается в диапазоне изменения показателя комкуемости от 0,6 до 0,8.

Как было установлено в результате проведения полного факторного эксперимента, к факторам, в значительной мере оказывающим влияние на прочность комков и скорость массообмена, относятся:

- конструктивные факторы, определяющие так называемый коэффициент заполнения тарели: диаметр днища тарели и высота её борта;
- технологические – качественные показатели - размер и прочность влажных гранул, определяют режим подачи жидкой фракции.
- факторы, относящиеся к режимным параметрам грануляторов, определяющих траекторию движения, а следовательно, и плотность образующихся гранул в грануляторе.

Решение задачи оптимизации конструктивных параметров гранулятора с активатором, а также определение режимов его работы, обеспечивающих заданную производительность, наименее затратно и эффективно при использовании методов математического моделирования и использовании компьютерной техники при проведении исследований, а также при управлении параметрами технологического процесса.

Как показал анализ полученных экспериментальных данных, полученных при исследовании процесса переката гранул (в процессе их гранулирования) по тарели гранулятора, происходит формирование зон и траекторий перемещений гранул (рисунок 12).

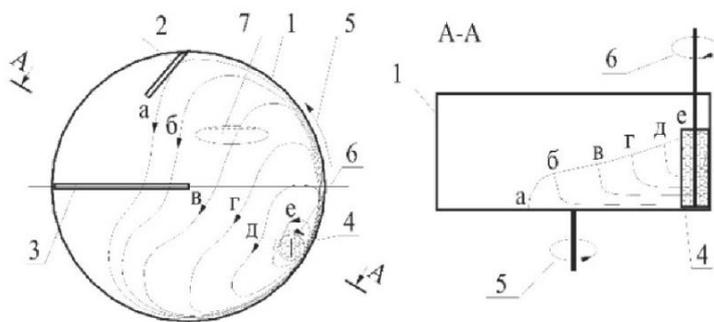


Рисунок 12 – Зоны и траектории перемещения гранул

На рисунке показаны: тарель (1); ножи отбойный (2) и донный (3); зона действия активатора (4), направление вращения тарели (5); 6 – активатор; 7 – зона распыления жидкости; а – условная траектория движения исходной смеси; е – траектория движения самых крупных агломератов; б, в, г, д- траектория движения гранул по мере их роста.

Представленный выше процесс можно представить как марковский процесс

можно представить как марковский процесс, т.е. физической системы, изменяющей свое положение и состояние, которые заранее не были запрограммированы. Одним из описаний таких систем может быть система дифференциальных уравнений Колмогорова. Необходимым условием для использования данных уравнений является условие нахождения полидисперсной смеси в процессе гранули-

рования в состояниях: 1 – частицы исходной смеси диаметром менее 0,25 мм; 2 – частицы – зародыши гранул; диаметр таких частиц 0,25-0,5 мм; 3 – частицы – гранулы; диаметр таких частиц 0,5-1 мм; 4 – частицы – гранулы; диаметр таких частиц 1-3 мм, что соответствует требованиям, предъявляемым к готовому продукту; однако плотность и содержание влаги в частице не соответствуют техническим условиям; 5 – плотные частицы, являющиеся частицами гарнисажа (донного и бокового); 6 – частицы – гранулы; диаметр таких частиц превышает 3 мм; 7 – частицы, представляющие собой готовые гранулы, имеющие соответствующие техническим условиям плотность и влагосодержание; диаметр частиц 1–3 мм.

Необходимым условием образования гарнисажа в грануляторе является содержание влаги в гранулируемой смеси не менее 11 процентов. Исходная влажность смеси в начальный период гранулирования не превышает 8 процентов, следовательно, в данный период образования гарнисажа не происходит; его появление начинается только при дальнейшем повышении влажности смеси.

На рисунке 13 приведен граф состояний быстрорастворимой полидисперсной смеси в грануляторе с активатором с образованием гарнисажа, построенный на основании изучения кинетики процесса гранулирования. При отсутствии гарнисажа пятая вершина и все связанные с ней связи (дуги) из графа исключаются

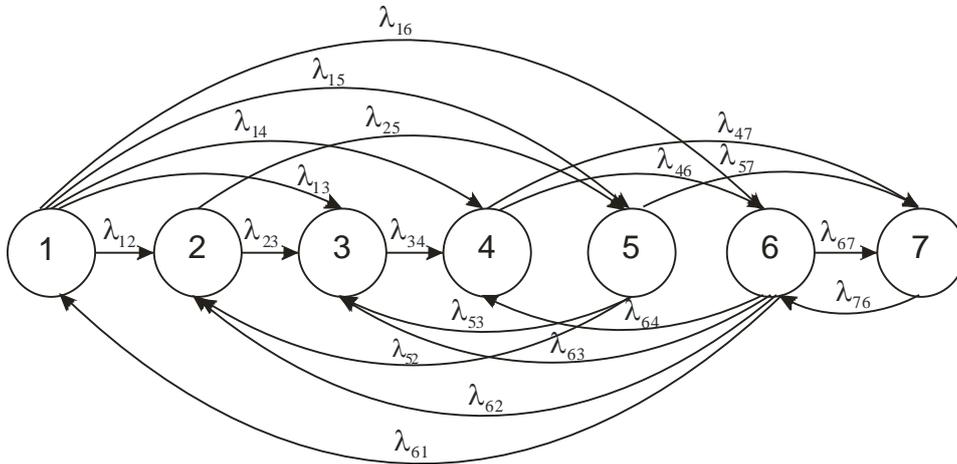


Рисунок 13 – Граф состояний гранулируемой смеси

При постулировании математической модели процесса образования гранул с использованием молочной сыворотки были применены дифференциальные уравнения Колмогорова с учетом корреляционных зависимостей, с помощью которых производится описание отдельных переходных процессов преобразования исходного продукта

$$\left. \begin{aligned} dP_1/dt &= -\lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{13}P_1(t) - \lambda_{14}P_1(t) - \lambda_{16}P_1(t) + \lambda_{61}P_6(t); \\ dP_2/dt &= -\lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{62}P_6(t) + \lambda_{12}P_1(t); \\ dP_3/dt &= -\lambda_{34}P_3(t) + \lambda_{63}P_6(t) + \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{13}P_1(t); \\ dP_4/dt &= -\lambda_{46}P_4(t) - \lambda_{47}P_4(t) + \lambda_{64}P_6(t) + \lambda_{34}P_3(t) + \lambda_{14}P_1(t); \\ dP_6/dt &= -\lambda_{61}P_6(t) - \lambda_{62}P_6(t) - \lambda_{63}P_6(t) - \lambda_{64}P_6(t) - \lambda_{67}P_6(t) + \lambda_{76}P_7(t) + \lambda_{46}P_4(t) + \lambda_{16}P_1(t); \\ dP_7/dt &= -\lambda_{76}P_7(t) + \lambda_{67}P_6(t) + \lambda_{47}P_4(t); \\ P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_6(t) + P_7(t) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} dP_1/dt &= -\lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{13}P_1(t) - \lambda_{14}P_1(t) - \lambda_{15}P_1(t) - \lambda_{16}P_1(t) + \lambda_{61}P_6(t); \\ dP_2/dt &= -\lambda_{23}P_2(t) - \lambda_{25}P_2(t) + \lambda_{52}P_5(t) + \lambda_{62}P_6(t) + \lambda_{12}P_1(t); \\ dP_3/dt &= -\lambda_{34}P_3(t) + \lambda_{53}P_5(t) + \lambda_{63}P_6(t) + \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{13}P_1(t); \\ dP_4/dt &= -\lambda_{46}P_4(t) - \lambda_{47}P_4(t) + \lambda_{64}P_6(t) + \lambda_{34}P_3(t) + \lambda_{14}P_1(t); \\ dP_5/dt &= -\lambda_{53}P_5(t) - \lambda_{52}P_5(t) - \lambda_{57}P_5(t) + \lambda_{25}P_2(t) + \lambda_{15}P_1(t); \\ dP_6/dt &= -\lambda_{61}P_6(t) - \lambda_{62}P_6(t) - \lambda_{63}P_6(t) - \lambda_{64}P_6(t) - \lambda_{67}P_6(t) + \lambda_{76}P_7(t) + \lambda_{46}P_4(t) + \lambda_{16}P_1(t); \\ dP_7/dt &= -\lambda_{76}P_7(t) + \lambda_{67}P_6(t) + \lambda_{57}P_5(t) + \lambda_{47}P_4(t); \\ P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_7(t) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $P_1(t) - P_7(t)$ – вероятность состояния исходной смеси в одном из семи состояний; данная вероятность находится отношением массы смеси в i -ом состоянии к суммарной массе гранул во всех состояниях; $\lambda_{12} - \lambda_{67}$ – интенсивность трансформации гранул.

Примем за интенсивность преобразования комкуемой смеси из одного состояния в другое соотношение приращения (как со знаком плюс, так и со знаком минус) массы продукта и временем, в течение которого произошло это приращение.

К основным факторам интенсивности трансформации гранулируемого продукта из одного состояния в другое (λ_{12}), можно отнести концентрацию сыворотки, (P_1); конструктивные параметры активатора и частоту его вращения; массу увлажняющей жидкости, поступающей в гранулятор; конструктивные размеры гранулятора, и в частности диаметр его тарели (D).

Обозначим минимальную линейную скорость частицы, при которой начинается процесс образования зародышей как V_m (м/сек); геометрическую площадь лопастей активатора как S (м²); исходное влагосодержание смеси как W_m (%); текущий вес гранулируемого продукта как G (кг); массовый расход влаги, F (кг/сек); время распыления влаги - Δt (сек); коэффициент, учитывающий долю влаги попавшей на гранулируемую смесь от количества влаги, поступающей в форсунку гранулятора (определяется экспериментально) - μ ; коэффициенты, учитывающие долю слагаемого из выражения (5) в интенсивности перехода исходной смеси в зародыши - K_{v2} (1/сек), K_{p2} (об / м² * сек²), K_w (1 / % * сек), K_{t2} (м / сек) (определяется экспериментально)..

Тогда интенсивность зародышеобразования можно определить по формуле

$$\lambda_{12} = K_{12} P_1 [K_{v2} (3,14dn / V_m - 1) + K_{p2} S P_1 / (0,001n) + K_w \exp(W_m + \mu(F\Delta t / G) * 100 / 2,1) + K_{t2} / D] \quad (5)$$

При проведении исследований по параметрической идентификации разработанной модели использовалось два массива экспериментальных данных: в первом массиве (при неизменных конструктивных параметрах гранулятора, комкуемости и влагосодержания продукта) задаются характеристики динамики протекания гранулообразования; второй массив включает в себя данные о гранулометрическом составе готовых продуктов.

На втором этапе совместно с проведением оценки адекватности математической модели идентификации осуществлялась корректировка коэффициентов, входящих в выражения, показывающие связь интенсивности переходов материала из одного состояния в другое ($K_{v2}, \dots, K_{v6}, K_{p2}, \dots, K_{p6}, \dots, K_{t1}, \dots, K_{t6}, K_w, K_K, K_n, K_s, K_y, K_z$) Корректировка коэффициентов производилась с помощью разработанной программы в интерактивном режиме при использовании второго массива экспериментальных данных.

В результате идентификации получены значения параметрических коэффициентов модели и получены зависимости для определения диаметра и угла наклона гранулятора, разработаны алгоритмы и программное обеспечение для расчета данных значений. Результаты расчетов и проверка по критериям сходимости показали адекватность постулированной математической модели реальному исследуемому процессу гранулирования.

Предложена методика определения оптимальных режимов работы гранулятора, его компоновки и конструктивных размеров с учётом способности полидисперсной смеси к агломерированию, а также её влажности. Определялось оптимальное значение показателя комкуемости в зависимости от показателей каждой партии гранулируемой смеси в зависимости от её состава, влажности и других свойств.

В шестой главе проведена разработка и исследование информационной модели технологических блоков. Анализ производства быстрорастворимых гранулированных напитков показывают их огромное многообразие, и перед проектировщиком каждый

раз встает дилемма, «какую последовательность процессов и каких нужно выстроить, чтобы получить требуемый продукт с определенными показателями качества». В этом случае, если исходить из того, что параметры качества пищевых продуктов продукту (органолептические, физико-химические, физико-механические) определяет потребитель, два взаимосвязанных цикла, технологический и эксплуатационный – будут являться подсистемами модели технологического потока. На третьем этапе, используя результаты проведенных научных исследований, определяется наиболее эффективная схема технологического процесса. Модель такой системы представлена на рисунке 14.

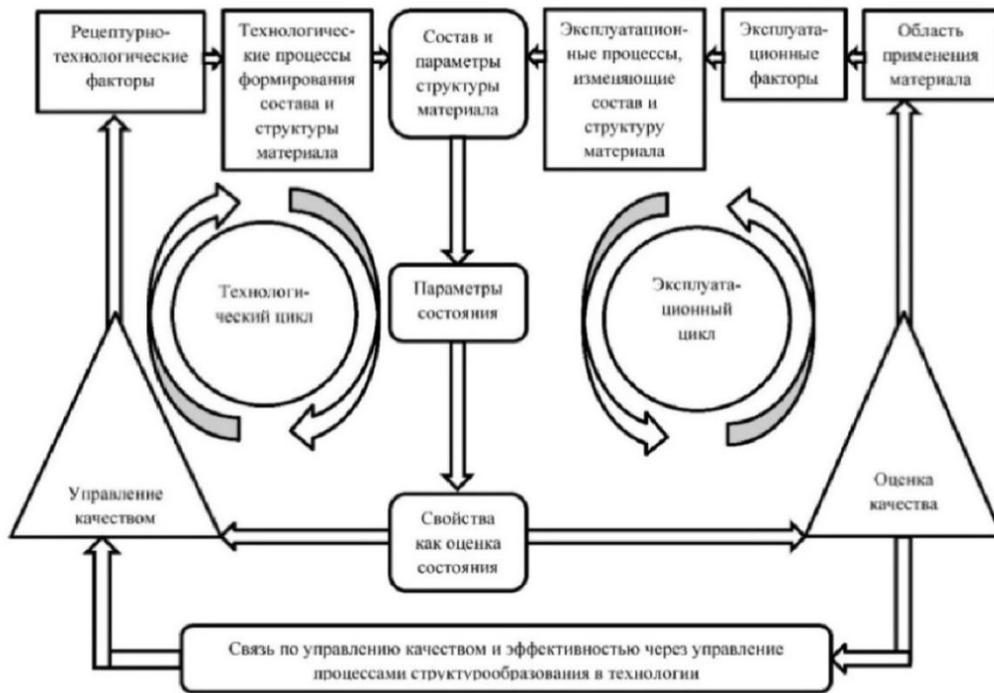


Рисунок 14 – Модель управления качеством многокомпонентных полидисперсных продуктов

Мониторинг качества получаемого продукта и влияющих на него управляющих воздействий проводится на протяжении каждого из циклов. При выявлении отклонений контролируемых параметров от заданных, принимается решение о внесении изменений в технологический процесс, либо о корректировке рецептуры конечного продукта.

Сложные производственные, научные и научно-производственные системы (производства) могут иметь в своем составе отдельные производства (подсистемы), системы (подсистемы) технологических воздействий (ТВ), системы (подсистемы) окружающей среды (С), влияющей на производство, отдельные модули и процессы, а также модули для установления корреляционных зависимостей всех подсистем, её формирование и исследование, создающие предпосылки к выработке принципов и научных основ разработки и технологического обеспечения параметров качества сухих гранулированных полидисперсных быстрорастворимых продуктов.

Развёрнутый граф, представляющий в графическом виде структуру взаимодействия всей цепочки технологического потока от входного параметра до конечного продукта, включая взаимодействия среды, технологических воздействий и технологических операций, показан на рисунке 15. Кроме названных выше технологических взаимодействий и параметров среды на графе показано взаимодействие факторов технологических операций в операторной форме (РМ), параметров комплекта оборудования (КО), процессоров технологического блока

(К), режимно-конструкторских параметров аппаратурного оформления технологического процесса (П); (n – признаки элементов систем).

Все составляющие названных систем должны соответствовать требованиям, которые предъявляются к качеству сырья, оборудования (проектируемому или имеющемуся), безопасности конечного продукта и его качеству, принципам модульности включая принцип блокчейн-дизайна, а также информационной совместимости. Оперативный мониторинг параметров качества, как всей исследуемой системы, так и её отдельных подсистем (технологических, конструктивных и др.), осуществляется на протяжении всего периода создания комплекса (ов) систем.

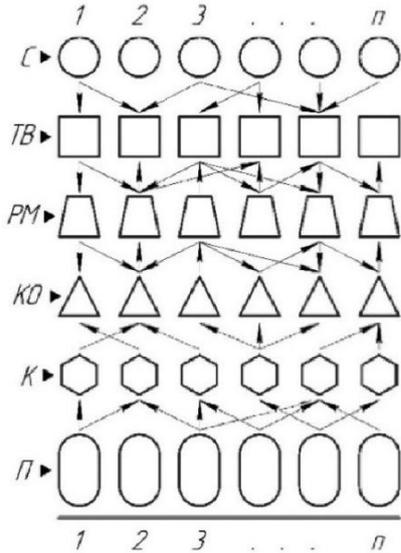


Рисунок 15 – Развёрнутый граф структуры взаимодействующих систем

Для получения качественного продукта с заданными показателями качества необходимо четкое соблюдение режимных параметров, а также соответствием исходных свойств сырья заданным значениям.

Данные воздействия на исходное сырье с целью получения качественного готового продукта могут быть представлены следующим выражением $\bar{S}(R, \sigma, \alpha, \beta, \gamma) \cdot \bar{V} = \bar{K} \cdot a$, где \bar{S} – вектор-функция описания функциональной зависимости параметров, определяющих свойства конечного продукта (гранулы), от макро-геометрии гранулы (R и β), обобщенного показателя межчастичной напряженности (σ), обобщенных показателей, предназначенных для характеристики связи тела гранулы и её поверхностного слоя (γ), а также физико-химических свойств полученной гранулы (α), векторов состояния (\bar{K}) и условий эксплуатации (\bar{V}), величины, учитывающей множество методов формования гранул (a).

Исходя из уравнения и приняв как основополагающий фактор вектор внешних воздействий, были произведены расчеты комбинированных методов (физико-механических и физико-химических). Алгоритм расчета приведен на рисунке 16.

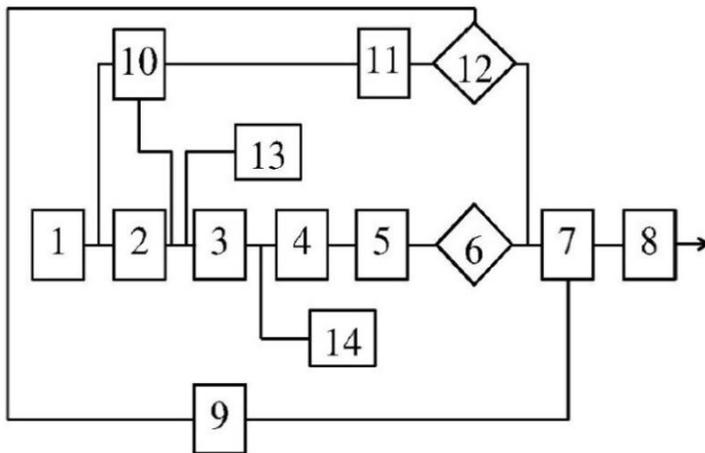


Рисунок 16 - Алгоритм расчёта комбинированного физико-химического и физико-механического методов

В основу алгоритма расчета положен принцип итерационных изменений вектора внешнего воздействия \bar{K}_0 , который соответствует заранее определенному вектору \bar{S} . Блок-схема алгоритма комбинированного физико-химического и физико-механического метода, представленная на рисунке 17, включает в себя исходные данные (блок 1) (рецептура продукта, дисперсность, растворимость, плотность и т.д.). Исходя из них задаются первоначальные значения вектора внеш-

него воздействия \bar{K}_0 - модель твердой гранулы (блок 2); данный блок включает в себя системы уравнений показывающих влияние вектором \bar{S} на изменение параметров исходной структуры.

Рассматривая и описывая характер взаимодействия гранулы с различными носителями внешних воздействий, описываемых вектором состояния, мы решим задачу целенаправленного формирования свойств гранулы. С помощью такого подхода могут быть созданы комбинации из различных процессов (физико-химических и физико-механических): сушка, пресование, окатывание и др. Такой энергетический подход даёт возможность прогноза создания наивыгоднейших сочетаний внешних воздействий, что позволяет улучшить конкретные качественные характеристики путем создания параллельных и последовательных комбинированных методов

Методология определения оптимального (рационального) способа гранулообразования заключается в систематичном анализе технологических процессов, как части технологического потока. В качестве исходных (задаваемых) факторов (параметров) принимаются: показатели качества производимого продукта; условия, необходимые для обеспечения задаваемых параметров; возможность применения способа гранулообразования к конкретным технологическим процессам; обеспечение показателей экономической эффективности.

Целесообразность применения того или иного способа определяется технико-экономическим критерием, устанавливающим корреляционную связь качественных показателей готового продукта со стоимостью производства

Для этого разрабатывают структуру технологического блока обеспечения качества формирования гранулированных пищевых полидисперсных систем. Систему технологического обеспечения качества формирования гранулированных пищевых полидисперсных систем можно описать как некую многомерную систему. В наших исследованиях она была представлена в виде куба, одна координата которого – это модуль сухого гранулированного пищевого продукта и комплексный показатель качества, вторая – система среды эксплуатации, третья - виду отказа.

В этом случае задаваясь критерием (критериями) экономичности, можно осуществить выбор, принимая во внимание (или задавая самостоятельно) возможности конкретного производства. Информационная модель технологического блока наряду с программным обеспечением её синтеза будут в этом случае являться конечной (или промежуточной в зависимости от стадии проектирования) целью.

Вводится критерий идентификации сочетаний технологических воздействий по значимости параметров матрицы технологических воздействий. Проводится выбор метода технологического обеспечения качества модуля гранулы.

Введем применительно к исследуемой системе следующие определения:

– функциональные показатели качества сухого гранулированного полидисперсного продукта (системы); обозначим данные показатели как ССО;

– параметры, которые можно отнести к параметрам внешнего воздействия – ССЭ (система среды эксплуатации); к данным параметрам можно отнести температуру, давление и влажность окружающей среды, и другие, включая, учитывая характер гранулируемого материала, биологическую активность, физико-химические внешние факторы и др.;

– режимные параметры технологических процессов, входящих в технологический поток (измельчения, смешивания, формообразования и сушки и др.) СГПС и технологические материалы (рецептурные и вспомогательные), прописанные в технологических инструкциях и технических условиях – система среды воздействия (ССВ);

– матрица технологического воздействия (МТВ)- реальное сочетание технологических параметров при определённом сочетании процессоров.

Оптимальное воздействие, которое обеспечивает распределение величин параметров качества, в общем виде может быть представлено как $L(K) = B$, которая показывает функциональную зависимость матрицы показателей качества (B) от множества (матрицы) параметров технологических воздействий (K) и функцией, характеризующей способ описания процессов (L) (рисунок 17). Цель проводимых исследований – решение задачи $\inf_{N \in CCO} M$

$L(K) - B = M(N)$, где N -критерий эксплуатации.

Этапы методики проектирования:

1. Задавая исходные данные (рецептура, органолептические показатели, форма изделия (порошок, гранула, таблетка, брикет)), условия хранения, срок хранения) формируется матрица параметров качества сырья (включая воду и воздух), каждой подсистемы и всего технологического потока в целом, включая хранение и восстановление изделия (гранулы и т.п.) в состояние пригодное для употребления в пищу: $B = \{a_i\}$, $i = \overline{1, n}$, где n -число определяющих параметров качества. Матрица B является формальным выражением системы среды отказа, а множество параметров качества a_i - множеством параметров состояния объекта.

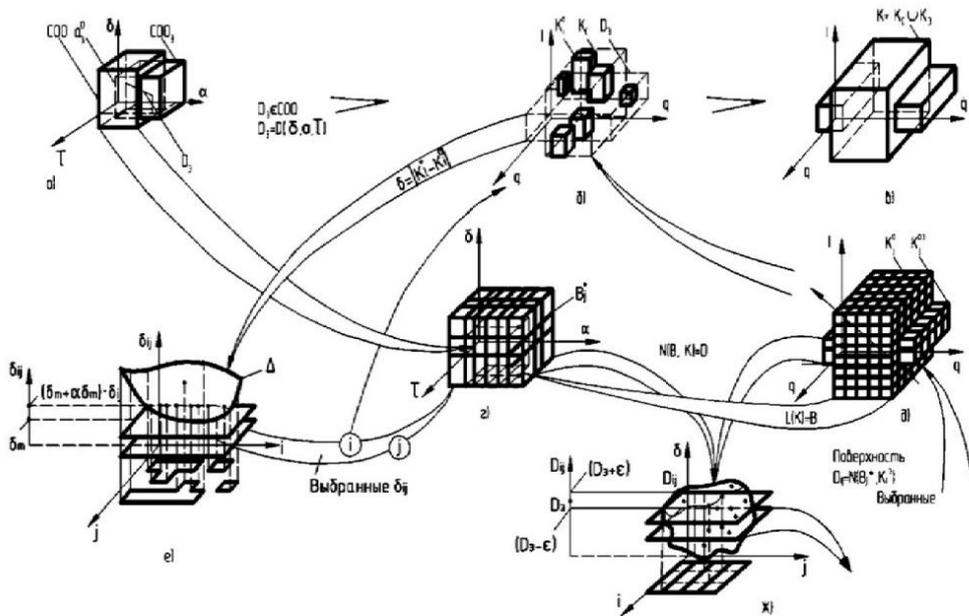


Рисунок 17 – Схема проектирования сочетаний воздействий

2. Из п. 1 выбирается число возможных (реальных) методов, обеспечивающих заданный критерий D_3 . Такое число, которое соответствует заданному, вполне определенному значению матрицы B , есть выражение функциональной связи критерия эксплуатации D_3 и параметрами качества a_i , т.е. $D_3 = D\{a_i\}$. Данная зависимость является формальным выражением системы среды отказов в той области, что соответствует показателю критерия эксплуатации (\mathcal{E}). Далее: из п.1 выбирается число возможных (реальных) методов, обеспечивающих заданный критерий D_3 .

2. Проводим аналогичную работу для внешнего воздействия в области формирования гранулы.

Объединённый комплекс K_ϕ и K_3 образует систему среды воздействия в целом, описываемую исходной матрицей K . В этом случае графическое (геометрическое) отображение исходная матрица K изображается как два объединенных параллелепипеда, определяемых K_ϕ и K_3 (рисунок 18-в);

Произведем деление (дискретизацию) систему среды воздействия с определенным шагом, соответствующему делению параметров исходной матрицы K с некоторым базовым шагом.

Решим обобщающую задачу применительно к каждому расчётному методу воздействия.

Континуум K_i^0 , (см. п. 2-а) матриц для реального расчётного метода приведена в таблице расчетных значений (таблица 2).

Для каждого из выбранных значений рассчитывается погрешность идентификации $\delta_{ij} = |K_j^* \cdot K_j^0|$. В результате определяется корреляционная зависимость погрешности идентификации расчётных методов и номеров i и j множества Δ .

Тогда, учитывая погрешности, производится выбор наименьших значений δ_{ij} , кото-

Таблица 2 - Таблица расчетных значений

Метод	Форма воздействия	q, Дж/м ³	q̇, Дж/(м ³ ·с)	I, Н·с	t, с
1. Смешивание и гранулирование окатыванием непосредственно в грануляторе	Параллельное сочетание физико-химического и механического воздействий	(0,7 - 5,2)10 ⁵	0,6·10 ² - 2,8·10 ³	1-6	160-560
2. Комбинированный: смешивание в смесителе и формообразование в грануляторе окатыванием	Последовательное сочетание физико-химических и механо-химических воздействий	(4,95-8,75)10 ⁸	8,25·10 ⁴ - 1,1·10 ⁶	0	150-366
3. Комбинированный: смешивание формообразование протиркой	Параллельно-последовательное сочетание физико-химических и механо-химических воздействий	(2,4-9,1)10 ⁸	6,3·10 ⁵ - 1,1·10 ⁷	5-600	15-1000
4. Комбинированный: смешивание и таблетирование	Последовательное сочетание физико-химических и механо-химических воздействий	(4,25 - 4,35)10 ¹¹	9,6·10 ⁵ - 2,8·10 ⁵	0	60-1080
5. Механический: экструдирование	Механическое воздействие	1,7·10 ⁶ - 7·10 ⁸	1,9·10 ⁵ - 3,5·10 ⁷	5-600	10-360

рые характеризуют отличие j -го метода (расчетного) от i -ого (реального). Далее для выбранных значений δ_{ij} , по номерам i и j производится идентификация, выбор матрицы K_j^0 и название метода.

Данные энергетические параметры, выбранный реальный способ обработки и плюс полученные экспериментальные данные служат основанием пересчета режимов используемого метода. При этом производится экспериментальное уточнение диапазонов технологических режимов с целью их оптимизации, рассчитываются режимно-аппаратурные характеристики технологических процессов.

Для того, чтобы представить, каким об-

разом параметры среды воздействия влияют на выходные параметры исследуемых модулей с учётом условий (среды) эксплуатации, системы среды отказов и другие факторы и системы в данной диссертационной работе была использована модель, представленная в виде виртуального многогранника, включающего в себя набор независимых, согласованных между собой элементов – конгруэнтных многогранников.

Все функциональные элементы технологии производства гранул формируются из 10 простых блоков. На рисунке 18 показана ранжированная схема связей среды эксплуатации, модулей и видов отказов.

Учитывая функциональную зависимость между условиями эксплуатации и параметрами элементов, которые взаимодействуют между собой, а также типом и частотой отказов, условия и технологичность производства, необходимо определить алгоритм формализованного подбора технологического блока, который решает проблему производства данного изделия при обеспечении наилучших экономических показателей конкретных условий производства.

Производство осуществляется по схеме, показанной на рисунке 9.

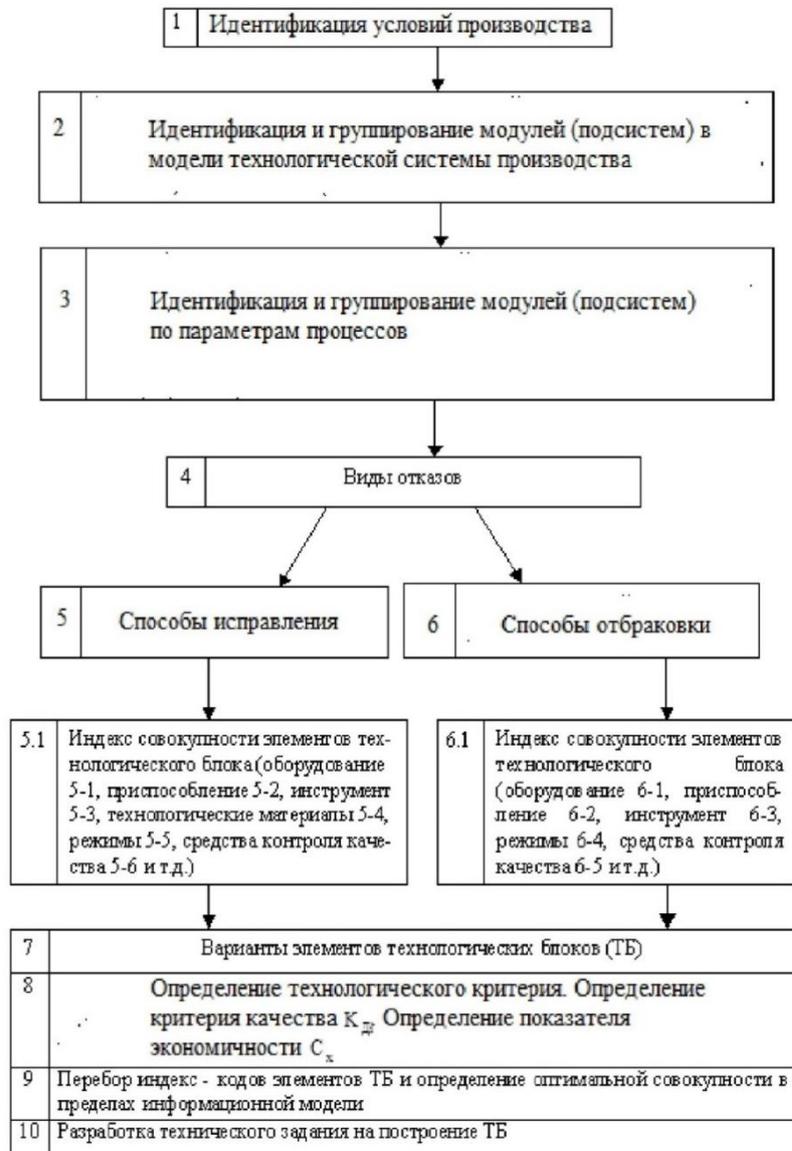


Рисунок 18 – Схема ранжированной последовательности формирования информационной модели ТБ

- систематизация и идентификация функциональных модулей по закономерностям структурообразования и влажности, пористости, размеров, определяемых условиями эксплуатации (блоки 1-4);
- систематизация, идентификация методов смешивания и формообразования функциональных структур (блоки 5 и 6);
- определение объективной связи между методами формообразования и функциональными структурами, представленной в виде таблиц с ячейками идентификации (блок 7);

- в блоке 7 – представление в виде таблиц с ячейками идентификации результатов определения корреляционной зависимости между функциональными структурами и методами формообразования

- создание алгоритма синтеза (логики формирования) технологического блока и оптимизации метода изготовления (блоки 8 и 9);

- формирование технического задания на организацию ТБ и апробация системы ТОК (технологическое обеспечение качества), (блок 10)

Создание исходной информационной модели ТБ производится в следующей последовательности:

1. На основании имеющихся литературных данных, а также данных, полученных на предварительном этапе, производится автоматическая селекция исходных данных;

2. Оптимизация (путем логического отбора) исходных данных, а также их сочетаний применительно к конкретному производству, технологическому модулю.

Идентификация отдельных элементов системы среды эксплуатации и системы конечного (выпускаемого продукта) производится с учетом структуры гранулы. Выполнение данного условия производится с помощью комплексного параметра качества для оценки равновесного состояния. С помощью этого параметра могут быть идентифицированы все подсистемы и процессоры технологического потока

Создаваемая (или созданная) модель позволяет формировать будущие характеристики гранул в процессе их изготовления за счет выбора оптимальной схемы гранулообразования (аппаратурного оформления, технологических режимов и др.).

Для оценки способов получения гранул на основании проведенного анализа литературных источников, а также собственных научно-исследовательские работ был выбран обобщенный технико-экономический критерий (показатель). Принимая во внимание, что при

Таблица 3 – Оценка степени влияния показателей способов гранулирования на характеристики гранул

Способ гранулирования		Взаимосвязи	Способ гранулирования (например): окатыванием	
Шифр	Характеристика		Шифр	Характеристика способа
1.1	Насыпная плотность		2.1	Сильные стороны: Возможность гранулирования полидисперсных материалов
1.2	Прочность		2.2	Высокая производительность процесса
			2.3	Получение заданных физико-химических свойств
1.3	Внутренний коэффициент трения		2.4	Слабые стороны: Необходимость предварительного смачивания
			2.5	Повышенные требования к дисперсности
1.4	Восстановление (растворение)		2.6	Значительные потери (расход) материала
			2.7	Необходимость введения влагопроводных компонентов

организации пищевых производств требования к экологической безопасности со временем только возрастают, определение оптимального способа гранулирования производится с использованием более «полного», комплексного критерия, который условно можно назвать комплексным технико-, эколого-экономическим:

Математическая модель, описываемая выражением $L(K) = B$, легла в основу разработанного алгоритма оптимизации выбора способа формообразования гранул концентратов напитков теоретическими методами.

Предложенная в работе методика обоснованного

выбора оптимального способа формообразования включает пять этапов:

1 – основываясь на совокупности структурно-механических и физико-химических свойств гранулируемого продукта производится выбор возможных способов формования изделия (таблица 3);

2 – объективная оценка достоинств и недостатков каждого из предложенных способов. При этом, к достоинствам способа относим те показатели которые прямым или косвенным способом способствуют увеличению срока хранения полученной продукции, и снижению ее себестоимости. В тоже время к недостаткам способа относим факторы, ведущие к появлению дополнительных расходов и снижению показателей качества вырабатываемой продукции.

3 – определение степени влияния выявленных достоинств и недостатков предложенных способов формообразования на качественные показатели гранул. Для практической реализации этого этапа рекомендуется использовать графо-аналитический метод, позволяющий выявить как единичное, так и совместное влияние характерных для рассматриваемого способа формообразования технологических параметров и показателей. Пример формирования графа для оценки степени влияния показателей и параметров формообразования на характеристики гранул показан в таблице 3.

4 – производится расчет коэффициентов значимости для каждого из способов; на основании этих расчетов производится ранжирование сильных и слабых сторон каждого способа гранулирования;

Принимая во внимание рассчитанные показатели коэффициента влияния и весомости способа гранулирования для наиболее часто применяющихся методов (способов), а также ранг (значимость), далее рассматривается влияние показателей гранулирования на характеристики готовых гранул, брикетов, таблеток (рисунок 19).

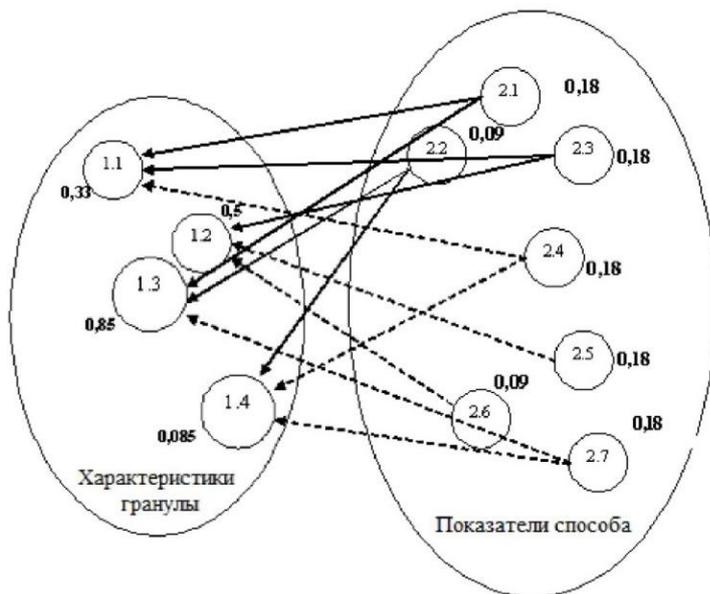


Рисунок 19 – Влияние показателей способов на характеристики сформованных гранул

тракта ягод. Для обоснования рецептурного состава проведены исследования химического состава ягод для оценки ее пищевой ценности и возможности использования в технологии гранулированных пищевых концентратов (киселей) в совокупности с творожной сывороткой.

Учитывая структуру ягод проводился её ферментативный гидролиз при котором большинство веществ, в том числе высокомолекулярные, нерастворимые соединения белковой и углеводной природы, связанные со структурными компонентами клеток, приобретают

Таким образом, учитывая конкретные производственные условия, имеющиеся или проектируемое аппаратное оформление подсистем, разработанная методика дает возможность выбора оптимального способа проектируемого производства. В процессе оптимизации приоритеты, находящиеся на начальных этапах на первых позициях, могут отойти на второй план (или исключаются), а принимаются во внимание новые, ранее не применявшиеся

В 7 и 8 главах приведены разработанные технологии напитков быстрорастворимых гранулированных напитков (киселя и завтрака) на основе молочной сыворотки и экс-

растворимые быстро набухающие свойства. Приведен химический, минеральный состав и содержание витаминов аронии до и после ферментации.

В составе рецептуры напитков использовалась сыворотка молочная сухая (творожная), соответствующая ГОСТ 33958-2016, также - нативная концентрированная сыворотка для увлажнения смеси. Концентрирование сыворотки производили в роторно-пленочным вакуум-испарителе совместно с соком ягоды в соотношении 1:3. Процесс осуществляется при температуре $49 \pm 1^\circ\text{C}$. По окончании концентрирования количество сухих веществ составляет $57,5 \pm 2,5$ мас.%. Установленные режимы обеспечивают снижение пенообразования и кислотности, повышают скорость упаривания.

Испытуемая смесь характеризуется относительно высокой концентрацией пектиновых соединений, аскорбиновой кислоты, биофлавоноидов, тиамина, пиридоксина и рибофлавина. Эти данные свидетельствуют о целесообразности использования смеси в рецептуре завтрака.

Рецептурный состав научно обоснован, исходя из характеристики ингредиентного состава растительных компонентов и их действующих начал, формирующих функциональные свойства специализированного продукта.

В качестве основного сырья для производства завтрака применяли экстракт из аронии, сыворотку творожную и муку овсяную, которая характеризуется не только высокой питательной ценностью, но и синергическим действием на обменные процессы. Положительное влияние на функциональные свойства завтрака оказывает введенный в рецептуру витаминно-минеральный премикс.

Проведена оценка сенсорных и органолептических показателей рецептурных вариантов, позволившие разработать сухой завтрак с заданными потребительскими свойствами (таблицы 4 и 5). Был выбран 2-й вариант.

Разработана технология, и, на основе предыдущих исследований, выбран для её реализации

Таблица 4 – Варианты рецептур
быстрорастворимых сухих завтраков

Наименование используемого сырья	Варианты		
	1	2	3
Экстракт аронии черноплодной (с.в. 60 %), %	12,0	10,0	5,0
Мука овсяная, %	40,0	50,0	60,0
Сухая подсырная сыворотка, %	6,5	8,0	5,0
Сахарная пудра, %	32,0	24,0	19,5
Творожная сыворотка (с.в. 60 %), %	6,0	3,1	5,0
Шрот аронии черноплодной, %	3,5	4,9	5,5
Итого:	100		

процесс формирования окатыванием. Схема технологического процесса производства завтрака гранулированного быстрорастворимого с использованием экстракта черноплодной рябины и молочной сыворотки аналогична схеме, представленной на рисунке 9.

На технологию разработаны технические условия и технологическая инструкция и она внедрена на ООО НПО «Здоровое питание» Исследование химического состава позволило определить энергетическую ценность быстрорастворимого завтрака, которая составляет 394 ккал/100 гранулированной формы или 98,5 ккал/200 мл восстановленного продукта.

Вышесказанное даёт основание утверждать о правильности методов проектирования технологических потоков, корректности назначения режимных параметрах технологических процессов производства гранулируемых быстрорастворимых концентратов напитков с использованием молочной сыворотки, гарантирующих безопасность продукта. При наличии в продукте сверх требуемого количества влаги (что может происходить за счет относительно

Таблица 5 – Сравнительная органолептическая оценка качества различных вариантов быстрорастворимых сухих завтраков

Наименование показателя	Варианты		
	1	2	3
Вкус и запах	9,20±0,35	9,78±0,35	8,40±0,35
Внешний вид и консистенция	5,00±0,00	6,00±0,00	5,60±0,49
Цвет	4,00±0,45	4,00±0,00	3,70±0,45
Комплексная оценка	18,20±0,80 (хорошо)	19,78±0,35 (отлично)	17,70±1,29 (хорошо)

высокой гигроскопичности сухого продукта) она может провоцировать микробиологическую порчу (вследствие развития нежелательной микрофлоры).

Известно, что

сухие продукты, исходя из своего назначения, представляют собой концентрированную форму нутриентов, где положительной характеристикой является хорошая сохраняемость биологически активных ингредиентов.

Внедрение новой технологии гранулированных напитков обеспечивает регламентируемые сроки хранения с сохранением критериев качества (пищевая ценность, сенсорные показатели), что подтверждается результатами комплексных исследований.

По аналогичной схеме разработана технология сухого гранулированного киселя.

Разработаны рекомендации по использованию результатов исследований. В приложении представлены программы для ЭВМ, результаты исследований и анализа качественных показателей продукции, а также материалы, подтверждающие практическое внедрение результатов работы.

ВЫВОДЫ

Разработаны теоретические основы обеспечения качества функциональных элементов технологического потока производства полидисперсных гранулированных (сформованных) продуктов питания, идея которых заключается в установлении закономерностей влияния среды эксплуатации, сред технологического воздействия, системы отказов на совокупность параметров качества функциональных модулей подсистем, определяющих надёжность формирования структуры, и синтезе информационных моделей технологических блоков. Такой системный подход к объективному обоснованию методологии обеспечения качества позволяет обосновать выбор методов и оборудования технологического воздействия, в том числе комбинированных, для достижения необходимых показателей качества.

1. В результате исследования процесса влажного структурообразования сывороткосодержащих смесей **выявлено**, что максимальная молекулярная влагоёмкость, является узловой точкой количественно–качественных изменений, происходящих в дисперсной системе при увлажнении или обезвоживании, и по соотношению её с текущим значением влагоёмкости можно прогнозировать связность и пластическую прочность влажного материала, тем самым направленно структурировать гранулированные напитки, обеспечивая заданные показатели качества.

2. Анализ проведенных исследований по уплотнению пластичных сывороткосодержащих полидисперсных смесей, **установил**, что объемная концентрация твердой фазы имеет максимальное значение при влажностях близких к наименьшей капиллярной, при этой же влажности содержание газовой фазы в системе оказывается минимальным, что можно объяснить степенью развития гидратных оболочек на поверхности твердых частиц и величиной критического давления, необходимого для сжатия системы. Доказано, что, изменяя концентрацию поровой суспензии в массе и регулируя ее коллоидно-химические свойства, можно целенаправленно воздействовать на уплотняемость масс и их свойства.

3. Доказано, что свойства формуемых масс при гранулировании предопределяются дисперсным составом и количественным соотношением сравнительно грубо-дисперсного структурного каркаса массы и тонкодисперсной поровой суспензии, а также ее реологическими и коллоидно-химическими свойствами. Структурно-механические свойства масс находятся в тесной взаимосвязи с водно-физическими характеристиками твердой фазы, а величина наименьшей капиллярной влажности является узловой точкой количественно-качественных изменений свойств влажного дисперсного материала.

4. Выявлены общие физико-химические закономерности формообразования и структурообразования многокомпонентной полидисперсной трёхфазной системы. Вскрытый механизм процессов при гранулировании методом окатывания различных продуктов на основе дисперсных систем, показал, что любая технология состоит из четырех основных технологических стадий (приготовление дисперсной смеси, формообразование, уплотнение и сушка или гидратация), основу которых составляют процессы трансформации трех типов структур – коагуляционной, конденсационной и кристаллизационной. Поэтому при последовательном формировании структуры дисперсных материалов рекомендована оптимизация процессов перестройки структур на всех технологических стадиях. В качестве критериев оптимизации предложено использовать объемные фазовые характеристики, отображающие наиболее общие признаки дисперсных систем, независимо от типа структуры, технологической стадии и вида энергетического воздействия на систему.

5. Проведены исследования и анализ процесса сушки дисперсных масс заданной формы и размеров. Установлено, что использование объемных фазовых характеристик даёт принципиально новую более полную количественную информацию о перестройке структуры материала по сравнению с использованием уравнений баланса массы. При этом выявлено, что режимные параметры сушки пропорциональны соотношению капиллярно-подвижной и капиллярно-неподвижной влаги, что предопределяет использование для комплексной оценки свойств материала величину наименьшей капиллярной влажности, значение которой обуславливает не только величину сил когезионно-адгезионного взаимодействия и усадку влажного материала при сушке, но и его теплофизические свойства.

6. На основе результатов теоретического и экспериментального исследования разработана технология сушки гранулята с использованием влагоёмких сред, обеспечивающих снижение его влагосодержания за счёт капиллярного влагообмена, что снижает содержание влаги перед сушкой до величины наименьшей капиллярной влажности, что способствует интенсификации процесса сушки с обеспечением заданного качества гранулята и снижению энергозатрат.

7. Научно обоснован алгоритм поиска оптимальных значений конструктивно-режимных параметров тарельчатого гранулятора с активатором, в котором в качестве критерия оптимальности используются качественные показатели и экономические затраты по выходу готового продукта. Разработана математическая модель процесса, которая включает в себя две системы линейных дифференциальных уравнений Колмогорова и совокупность уравнений, связывающих интенсивность преобразования материала с параметрами гранулятора и свойствами гранулируемой смеси дисперсных продуктов. Разработана система управления подсистемой гранулирования порошкообразных смесей для сывороткосодержащих напитков, которая позволяет находить оптимальные режимы работы тарельчатых грануляторов с активатором для потоков полидисперсных смесей, характеризующихся нестационарностью характери-

стик, повысить эффективность процесса гранулирования полидисперсных смесей. Выявлены оптимальные режимно- технологические параметры работы тарельчатого гранулятора, при которых получают наиболее качественные гранулы: влажность грануляции – 12-813%; время гранулирования – 10-15 мин, угол наклона тарели – 45° и число оборотов тарели 28-32 об/мин.

8. На основании системного подхода проведены комплексные теоретические и экспериментальные исследования процессов структурообразования дисперсных смесей (плодово-ягодный шрот, сухая сыворотка, сахарная пудра, крахмал, и концентрированные соки и концентрированная нативная сыворотка) и технологических свойств готового концентрата напитка и условий его восстановления, в результате которых разработаны новые подходы к синтезу, расчету и оптимизации технологий и процессов быстрорастворимых многокомпонентных полидисперсных гранулированных сывороткосодержащих напитков с заданными показателями качества.

9. Аналитически разработана и экспериментально подтверждена методология создания технологий гранулированных окатыванием быстрорастворимых сывороткосодержащих напитков из многокомпонентных полидисперсных смесей продуктов, получение которых связано с необходимостью последовательного осуществления четырех технологических стадий - приготовления исходной дисперсной системы, придания ей необходимой формы, переводом коагуляционной структуры изделий в конденсационную и далее - в кристаллизационную.

10. Разработана и теоретически обоснована методика и логика обеспечения заданных параметров качества функциональных элементов путём выявления закономерностей влияния системы потребительской среды, системы среды технологических факторов, воздействия системы среды отказов на параметры качества и надёжности технологических потоков.

11. Разработана информационная математическая модель технологического блока, на базе которой создана методика выбора оптимального способа производства (технологического модуля, системы модулей), исходя из конкретных производственных условий и аппаратурного оформления подсистем. На основании её построен алгоритм оптимизации выбора способа и режимов формования гранул сывороткосодержащих напитков теоретическими методами. Предложен алгоритм разработки рационального технологического потока производства гранулированных концентратов напитков.

12. Основные результаты апробированы, протестированы и внедрены на предприятиях АО Финансовая агропромышленная корпорация «Туймаада» (Республика Саха (Якутия)), ООО НПО «Здоровое питание» (г. Кемерово), ООО «Химпром» (г. Кемерово), ООО «Биоцен» (г. Томск).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Монографии

1. Майтаков, А. Л. Теоретические основы обеспечения качества функциональных элементов пищевых машин на основе формирования моделей технологических блоков: монография / А. Л. Майтаков; Кузбассвузиздат. - Кемерово, 2010. – 139 с.

2. Майтаков, А. Л. Моделирование и многокритериальный синтез производства гранулированных пищекоцентратов: монография / А. Л. Майтаков; Кемеровский

технологический институт пищевой промышленности (университет). – Кемерово, 2017. – 224 с.

3. Майтаков, А. Л. Особенности технологии гранулирования полидисперсных смесей с молочной сывороткой: монография / А. Л. Майтаков; Кемеровский государственный университет. – Кемерово, 2020. – 123 с.

Публикации в WOS и Scopus

1. **Maytakov, A. L.** Study of the process of concentration as a factor of product quality formation / A. L. Maytakov, Sh. T. Yusupov., A. M. Popov, S. N. Kravchenko., I. A. Bakin // Food and raw materials. – 2018. – vol. 6. – № 1. – P. 172-181.

2.. **Майтаков, А. Л.** Перспективы развития безотходных технологий продуктов на основе растительного сырья и молочной сыворотки / А. Л. Майтаков, А. А. Сарфанов // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – № 2. – С. 261-272.

3. **Майтаков, А. Л.** Математическая модель процесса гранулообразования дисперсных смесей на основе молочной сыворотки в аппаратах тарельчатого типа /А.Л. Майтаков// Техника и технология пищевых производств. – 2020. – № 3. – С. 383-392.

4. **Maytakov, A. L.** Mathematic simulation of operation of the continuously operating extractor with the vibrational nozzle / A. L. Maytakov, N. T. Vetrova, P. P. Ivanov, L. A. Ivanova, A. A. Kukhlenko, A. G. Semenov // Journal of critical reviews. – 2020. – vol. 7, issue 09. – P. 1758-1772.

5. **Maytakov, A. L.** Development of information support for the technological production process of drinks based on plant roughage. / Anatoliy Maytakov, Sergey Pachkin, Pavel Ivanov, Liliya Beryazeva, Roman Kotlyarov. // E3S Web of Conf., 222 (2020) 01017. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022201017>.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. **Майтаков, А. Л.** Оптимизация процесса гранулообразования активатором - дезинтегратором / А. Л. Майтаков, А. М. Попов, Л. Н. Берязева // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. - № 1. - С. 21–24.

2. **Майтаков, А. Л.** Научные предпосылки технологического обеспечения качества восстановления и повышения надёжности пищевых машин / А. Л. Майтаков, Б. И. Коган // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2008. – № 2 (66). – С. 79–82.

3. **Майтаков, А. Л.** Формирование моделей технологических блоков для обеспечения качества машин и аппаратов пищевых производств / А.Л. Майтаков // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2008. – № 4. – С. 92–93.

4. **Майтаков, А. Л.** Основы формирования информационных моделей технологических блоков для обеспечения качества деталей пищевых машин / А. Л. Майтаков, Б. И. Коган // Техника и технология пищевых производств. – 2009. – № 1. – С. 96-98.

5. **Майтаков, А. Л.** Пути оптимизации процесса гранулообразования в тарельчатых грануляторах / А. Л. Майтаков, А. М. Попов, Л. Н. Берязева // Техника и технология пищевых производств. – 2009. – № 4. – С. 47-50.

6. **Майтаков, А. Л.** Формирование моделей технологических блоков для обеспечения функционального качества пищевых машин / А. Л. Майтаков, Б. И. Коган. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2009. – № 4 (74). – С. 29–33.

7. **Майтаков, А. Л.** Использование моделей технологических блоков для обеспечения качества функциональных поверхностей пищевых машин / А. Л. Майтаков, Б. И. Коган, Н. Т. Ветрова // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2010. –№ 1. – С. 73–75.

8. **Майтаков, А. Л.** Обеспечение качества рабочих элементов пищевых машин путём создания информационных моделей технологических блоков / А.Л. Майтаков, Л. Н. Берязева, Н. Т. Ветрова // Техника и технология пищевых производств. – 2010. – № 1. – С. 28–31.

9. **Майтаков, А. Л.** Использование фазовой диаграммы дисперсных систем при исследовании процесса сушки / А. Л. Майтаков, А. М. Попов, Л. Н. Берязева // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2011. – № 7. – С. 21-22.

10. **Майтаков, А. Л.** Исследование потребительских свойств и определение регламентируемых показателей качества быстрорастворимого завтрака на основе молочной сыворотки и экстракта аронии черноплодной / А.Л. Майтаков// Техника и технология пищевых производств. – 2012. – № 3 (26). – С. 62-67.

11. **Майтаков, А. Л.** Товароведные характеристики быстрорастворимого гранулированного киселя на основе местного растительного сырья / А.Л. Майтаков// Товаровед продовольственных товаров. – 2012. – № 11. – С. 25-28.

12. **Майтаков, А. Л.** Синергетика технологий производства многокомпонентных продуктов / А. Л. Майтаков, А. М. Попов // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2018.– № 2-3. – С. 112-116.

13. **Майтаков, А. Л.** Оптимизация информационных моделей технологических блоков формообразования гранул пищекокцентратов / А. Л. Майтаков, А. М. Попов, Л. Н. Берязева, Н. Т. Ветрова // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2018. – № 5-6. – С. 86–89.

14. **Майтаков, А. Л.** Моделирование технологий производства многокомпонентных гранулированных продуктов / А. Л. Майтаков, А. М. Попов, Л. Н. Берязева, Н. Т. Ветрова, М. А. Зверикова. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. –2018. – Том 80. – № 4. – С. 63-68.

15. **Майтаков, А. Л.** Моделирование технологии получения гранулированных быстрорастворимых киселей на основе молочной сыворотки и местного растительного сырья / А. Л. Майтаков, Л. Н. Берязева, Н. Т. Ветрова, К. Б. Плотников // Известия ВУЗов. Пищевая технология. –2020. – № 2-3. – С. 38-41.

Патенты РФ

1 Патент 2497489 RU, МПК А61F 7/12, А61N 2/10. Способ локального индукционного нагрева / А. М. Осинцев, **А. Л. Майтаков**, И. Л. Васильченко, В. М. Виноградов, В. В. Рынк. (RU) // 2012122956/14; Заявл. 04.06.2012; опубл. 10.11. 2013, опубл. в Б.И. № 31.

2. Патент 2625982 RU, МПК С09К 5/00, А23В 7/04, А23L 3/36/ Способ быстрого замораживания овощных полуфабрикатов / И. А. Короткий, **А. Л. Майтаков**, Г. Ф. Сахабутдинова (RU); № 2016125508; Заявл. .24.06.2016, опубл. 20.07.2017; опубл. в Б.И. № 20.

Свидетельства

1. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № RU2021612232. Программа оптимизации работы аппарата для гранулирования в тарельчатых грануляторах с диспергатором / **А. Л. Майтаков**, Д. М. Попов, К. Б. Плотников, И. Б. Плотников, Д. В. Доня // Заявл. 04.02.2921, опубл. 15.02.2921 в Б.И. № 2.

2. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № RU22021612367. Программа оптимизации выбора аппаратов, процессов и технологии гранулирования / **А. Л. Майтаков**, Д. М. Попов, К. Б. Плотников, И. Б. Плотников, Д. В. Доня // Заявл. 04.02.2921, опубл. 16.02.2921 в Б.И. № 2.