

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кемеровский государственный университет»

На правах рукописи



Майтаков Анатолий Леонидович

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

Специальность 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

Специальность 05.18.04 – Технология мясных, молочных и рыбных
продуктов и холодильных производств

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Попов Анатолий Михайлович,

на соискание ученой степени доктора технических наук

Кемерово 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР	19
1.1 Анализ использования молочной сыворотки как белково-углеводного сырья	19
1.2 Основные направления переработки молочной сыворотки	24
1.3 Особенности технологий гранулирования молочной сыворотки	36
1.4 Системный анализ технологических процессов производства гранулированных продуктов: механизм и основные закономерности	39
1.5 Метод и методика системного анализа	46
1.6 Эволюция представлений о моделировании в производстве многокомпонентных полидисперсных пищевых концентратов	48
1.6.1 Требования к математическим моделям синтеза технологических потоков многокомпонентных гранулированных пищевых концентратов	52
1.6.2 Моделирование физических и технологических процессов синтеза	53
1.6.3 Современное состояние моделирования технологий и системно-информационный подход при разработке новых и совершенствовании существующих технологий в условиях информационной неопределённости	59
1.6.4 Реализация модульного принципа в производстве гранулированных продуктов на основе молочной сыворотки с позиций системного подхода	61
1.7 Особенности технологий и процессов многокомпонентных гранулированных пищевых концентратов с сухой молочной сывороткой и их классификация	66
1.8 Классификация полидисперсных многокомпонентных сред и уровни рассмотрения их как объектов	73
1.9 Заключение по аналитическому обзору, обоснование основных	

направлений исследований, цели и задачи	81
Глава 2. МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ПРОИЗВОДСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ КОНЦЕНТРАТОВ НАПИТКОВ	91
2.1 Понятия и определения системологии	92
2.2 Системность производства быстрорастворимых гранулированных напитков	94
2.3 Стрoение технологической системы	96
2.4 Стрoение физико-химической системы	99
2.5 Организация, схема и методы исследований	101
Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ГРАНУЛ СЫВОРОТКОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИЙ	113
3.1 Исследование влияния технологических факторов на процесс формирования полидисперсных гранулированных продуктов на основе молочной сыворотки	117
3.2 Исследование процесса структурoобразования многокомпонентных сывороткосодержащих гранулированных продуктов	131
3.3 Особенности структурoобразования гранул, содержащих сыворотку	151
3.4 Исследование структурно-механических свойств гранулированной сыворотки и сывороткосодержащих композиций	156
3.5 Формирование структуры гранулы при сушке	165
Глава 4. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ГРАНУЛИРОВАНИЯ СЫВОРОТКОСОДЕРЖАЩИХ НАПИТКОВ	173
4.1 Технология гранулирования сыворотки и сывороткосодержащих композиций	173
4.2 Диагностирование технологии через параметр качества – восстанавливаемость	184
4.3 Изучение состава, свойств, пищевой ценности сухой гранулированной сыворотки	189

4.4 Исследование структурно-механических свойств гранулированной сыворотки и сывороткосодержащих композиций	197
Глава 5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОТОКА ПРОИЗВОДСТВА СЫВОРОТКОСОДЕРЖАЩИХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ	207
5.1 Синтез технологического потока производства сухих структурированных продуктов	207
5.2 Разработка математической модели процесса в подсистеме «С».	240
5.3 Результаты идентификационных экспериментальных исследований	256
5.4 Алгоритмы параметрической идентификации процесса гранулирования полидисперсных продуктов	258
Глава 6. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БЛОКОВ ПРОИЗВОДСТВА ГРАНУЛИРОВАННЫХ СЫВОРОТКОСОДЕРЖАЩИХ НАПИТКОВ	276
6.1 Разработка структуры технологического блока	287
6.2 Формирование и оптимизация виртуальной информационной модели технологического блока формообразования гранул сывороткосодержащих пищевых концентратов	297
Глава 7. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ЗАВТРАКОВ НА ОСНОВЕ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ	314
7.1 Быстрорастворимый гранулированный завтрак на основе молочной сыворотки и экстракта аронии черноплодной	312
7.1.1 Научное обоснование рецептуры	312
7.1.2 Рецептурный состав	312
7.1.3. Технология производства	324
7.1.4 Исследование потребительских свойств. Определение регламентируемых показателей качества, сроков и режимов хранения . . .	327
7.2 Быстрорастворимый гранулированный завтрак на основе молочной сыворотки и рябины обыкновенной	335

7.2.1 Научное обоснование рецептуры	335
7.2.2 Рецептурный состав	346
7.2.3 Технология производства	350
7.2.4 Исследование потребительских свойств. Определение регламентируемых показателей качества, пищевой ценности, сроков и режимов хранения	353
Глава 8. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА БЫСТРОРАСТВОРИМЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ КИСЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ	361
8.1 Гранулированный кисель на основе аронии черноплодной и молочной сыворотки	361
8.1.1 Технология производства	361
8.1.2. Исследования показателей безопасности при хранении. Определение регламентируемых показателей качества, сроков и режимов хранения	364
8.2 Гранулированный витаминизированный кисель с использованием овсяной муки, картофельного крахмала, яблочного, лимонникового и облепихового соков, стевии и фруктозы	369
8.2.1 Разработка рецептур	369
8.2.2 Разработка технологии производства функциональных быстрорастворимых киселей	376
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	383
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫВОДЫ	383
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	388
ПРИЛОЖЕНИЕ А	425
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	429
ПРИЛОЖЕНИЕ В	431
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	432
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	433
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	434

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	435
ПРИЛОЖЕНИЕ З	437
ПРИЛОЖЕНИЕ И	438

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Обеспечение продуктового (продовольственного) рынка высококачественными конкурентноспособными пищевыми продуктами функционального назначения на основе отечественного (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, а также молочной сыворотки позволяет создать широкий ассортимент напитков. Варьируя рецептурный состав можно получить продукты (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. Храмцова, В. Д. Харитонов, Л. А. Остроумова, Л. В. Донченко, В. М. Позняковского, И. С. Хамагаевой, и их учеников и других ученых и специалистов.

Важной проблемой является совершенствование процессов и технологий получения таких продуктов. Решение данной проблемы лежит в области создания многофункциональных машин и аппаратов (например, для извлечения ценных компонентов из сырья растительного происхождения) и является предпосылкой для разработки унифицированных технологических потоков. Исследования, проведенные за последние годы, показали, что варьируя физические свойства исходного порошкообразного сырья, можно «создать» быстрорастворимые концентраты, отвечающие самым высоким требованиям качества.

Таким образом, разработку и производство таких продуктов можно без сомнений отнести к актуальным научным и практическим проблемам, которые требуют своего решения на современном этапе.

Научную основу теории по разработке и созданию быстрорастворимых (в зарубежных источниках – инстанты) 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. Воларович, 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.

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 неопределённости (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 математических 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 (разработанная на основании вышеуказанного документа). В диссертационной работе обобщены результаты теоретических расчетов и моделирования процессов гранулирования, экспериментальных разработок, а также решения прикладных задач. 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 приготовления быстрорастворимых продуктов (в зарубежной литературе – *инстант*- продукты) составляет физико-химическая механика дисперсных систем. Эта наука, основоположником, которой является академик П. А. Ребиндер, возникла на стыке физикохимии, механики дисперсных систем, коллоидной химии и молекулярной физики. В настоящее время она широко применяется в разных областях получения дисперсных систем с заданными свойствами и структурой. Исследованиям в этой области посвящены работы М. П. Воларовича, А. В. Лыкова, Н. В. Михайлова, В. И. Лихтмана, Е. Д. Щукина, Н. Б. Урьева, Н. Н. Крутицкого, Б. В. Дерягина, А. Д. Зимова, А. А. Трапезникова, И. Н.

Владовца, Ю. С. Липатова, А. В. Дунайского, Ф. Д. Овчаренко, И. В. Крагельского, применительно к пищевым материалам – В. Д. Харитонов, Н. Н. Липатова, А. В. Горбатова, И. А. Рогова, А. М. Попова, А.Ю. Просекова. 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 системы 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 вяжущих 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 проведённого 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 аппаратного и процессного 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 (Приложение В);

– технологическая инструкция по производству завтрака гранулированного на основе молочной сыворотки (Приложение Г);

– «Кисели плодово-ягодные, быстрорастворимые, гранулированные». Технические условия (с изменениями и дополнениями) - ТУ 9195-001-16362254-19 (Приложение Д);

– технологическая инструкция по производству киселей плодово-ягодных быстрорастворимых, гранулированных (Приложение Е);

Разработанные технологии апробированы, протестированы и внедрены на предприятиях: АО Финансовая агропромышленная корпорация «Гуймаада» (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 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.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Брянск, 2007), 10-й Международной научно-практической конференции «Технологии

ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструментов и технологической оснастки» (Санкт-Петербург, 2008), Международной научно - практической конференции «Чистая вода – 2009» (Кемерово, 2009), IV Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». (Санкт-Петербург, 2009), 8-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» (Новосибирск, 2010), VIII Международной научно-практической конференции «Predny vedecke novinky – 2012» (Praha, 2012), VIII Международной научно-практической конференции Wschodnie partnerstwo – 2012» (Przemysl, 2012), (Przemysl, 2012), Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии в пищевой промышленности и общественном питании» (Екатеринбург, 2017), XVI международной научно-практической конференции «Topical areas of fundamental and applied research» (North Charleston, 2018), Национальной конференции «Современные тенденции развития науки» (Кемерово, 2018), IX международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 2019), International Conference Communicative Strategies of Information Society «Advances in Social Science, Education and Humanities Research» (Санкт-Петербург, 2018), 1-й национальной конференции «Холодильная техника и технологии» (Кемерово, 2019), Национальной (Всероссийской) конференции «Актуальные направления научных исследований: технологии, качество и безопасность» (Кемерово, 2020).

Соответствие темы паспорту научной специальности. Диссертационные исследования соответствуют пунктам 1, 2, 3.3, 3.4, 4 паспорта специальности 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств и пунктам 2, 6, 9 паспорта специальности 05.18.04 – Технология мясных, молочных и рыбных продуктов и холодильных производств

Публикации результатов исследований. 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 объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, заключения, выводов, списка литературы и 6 приложений, изложена на 438 страницах основного текста, содержит 106 таблиц, 74 рисунка, 87 формул. Список использованной литературы включает 381 наименование, в том числе 97 зарубежных источников.

Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

1.1 Анализ использования молочной сыворотки как белково-углеводного сырья

Молочная сыворотка является побочным продуктом переработки молока при производстве творога, сыров, казеина. В результате такой переработки молока, связанной с извлечением белковых веществ, большая часть перерабатываемого сырья переходит в сыворотку. Так, теоретический выход составляет до 90%, на практике – от 65% до 80% в зависимости от конечного продукта (таблица 1.1) [276,286].

Таблица 1.1 – Выход сыворотки в зависимости от вырабатываемого продукта

Вырабатываемый продукт		Выход сыворотки, % от перерабатываемого сырья
Сыры	натуральные	80
	низко жирные и обезжиренные	65
Брынзы		65
Творог		80
Казеин		75

Физические свойства сыворотки, ее пищевая ценность (в том числе энергетическая) и состав напрямую определяются способом производства конечного продукта. Так, свойства творожной сыворотки зависят от способа выработки творога – кислотный или сычужный, с отвариванием или без него. В любом случае в сыворотку перейдет до 50% сухих веществ молока (таблице 1.2) [272,328].

Состав молочной сыворотки включает почти все вещества и соединения, присутствующие в исходном сырье – молоке, а их насчитывается около 250 [274] (рисунок 1.1).

Свойства и состав молочной сыворотки зависят от сезона сбора молока, поэтому, как правило, во внимание принимают так называемый его средний состав (таблица 1.3).

Таблица 1.2 – Степень перехода ряда веществ молока в сыворотку

Компонент молока		Степень перехода в сыворотку, %
Молочный жир		7,7
Белки	казеин	22,5
	сывороточные белки	95,0
Лактоза		96,2
Минеральные соли		81,1
Сухие вещества всего		49,9

Таблица 1.3 – Средний состав молочной сыворотки

Компонент сыворотки	Содержание сухих веществ	
	г., на 100мл сыворотки	%
Лактоза	4,66	71,1
Белковые вещества	0,91	14,0
Минеральные вещества	0,50	7,7
Жир	0,37	5,7
Прочие	0,06	0,9
Итого	6,5	100

Анализ данных, представленных в таблице 1.3, говорит о том, что белковый состав включает следующие сывороточные белки: альбумин, лактоальбумин (α -форма, β -форма), иммуноглобулин, протеозопептон. Первые три белковые фракции из указанных чувствительны к высоким температурам, т.е. являются термолабильными. Последняя из указанных белковых фракций термоустойчива. Термолабильные белковые вещества начинают денатурировать при температурах выше 60°C (лактоальбумин). Температуры денатурации альбумина и иммуноглобулина начинаются от 75°C . Протеозопептонные белковые вещества начинают денатурировать от 95°C .

Также на основе анализа данных таблицы 1.3 можно заключить, что основную часть сухого вещества сыворотки (более 70%) составляет лактоза.

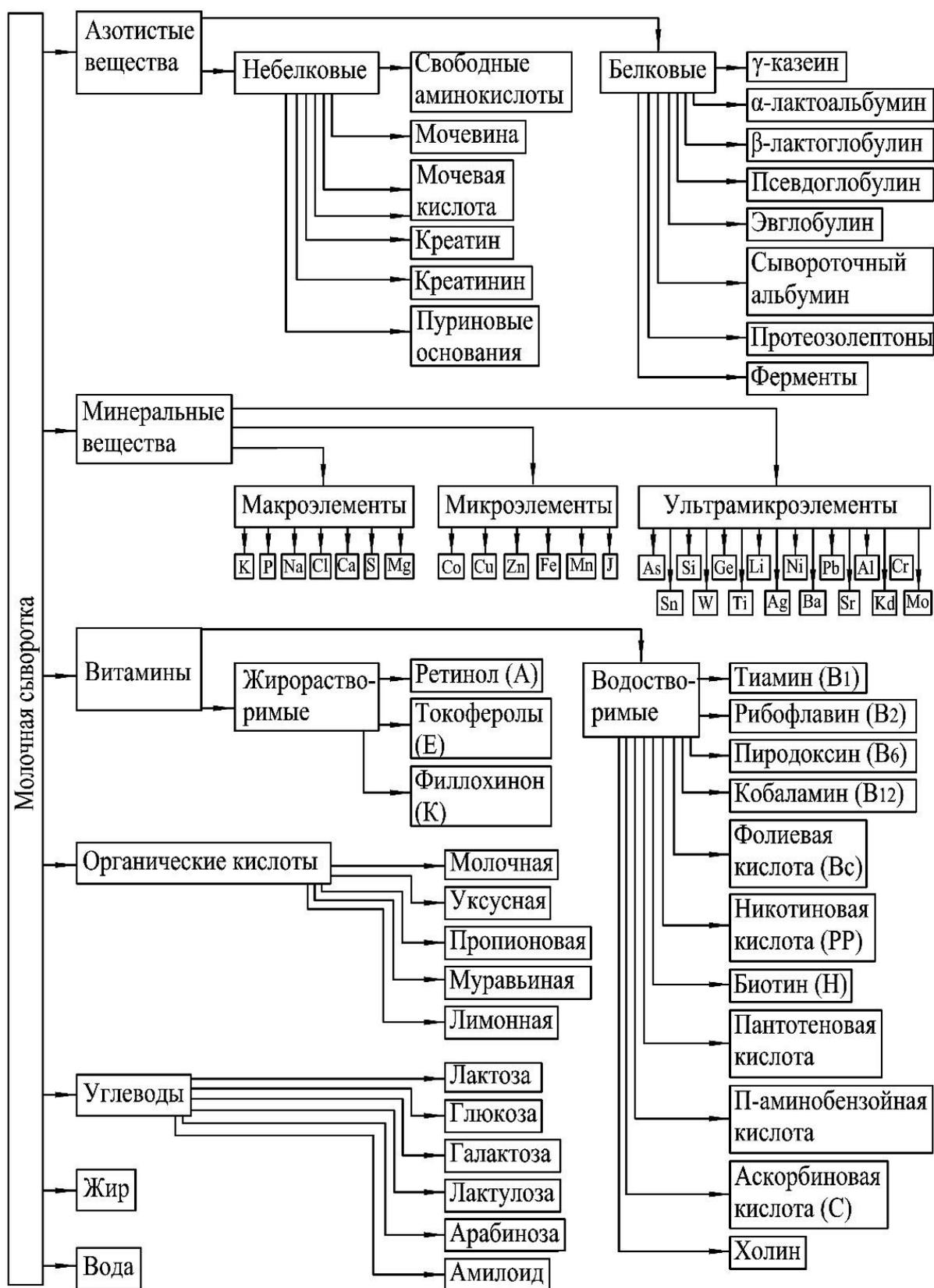


Рисунок 1.1 – Химический состав молочной сыворотки

Для молочной сыворотки характерно высокое содержание аминокислот. Из двадцати существующих аминокислот сыворотка не содержит только глутамин и аспарагин. В число аминокислот сыворотки входят десять незаменимых.

Белковые соединения в составе молочной сыворотки необходимы организму для полноценного обмена веществ. Белки молочной сыворотки содержатся как в форме белковых соединений, так и в свободной форме. Их соотношение в зависимости от вида сыворотки (подсырная или творожная) меняется. Содержание свободных аминокислот в подсырной сыворотке составляет 133 мл/л, в творожной – 450 мл/л.

Молочная сыворотка, как правило, является обезжиренным продуктом, так как содержание в ней жира составляет около 0,9% сухих веществ. Жир присутствует в диспергированном состоянии, причем степень диспергирования выше, чем в молоке, поэтому сыворотка обладает лучшей способностью усваиваться организмом человека [17,28,83,273,327].

Молочная сыворотка включает практически все микроэлементы молока, а также низкомолекулярные вещества, в том числе соли, содержащиеся в молоке и вводимые в него в процессе выработки продукта.

Можно утверждать, что молочная сыворотка – продукт, содержащий набор всех жизненно важных веществ.

Приведем некоторые результаты лабораторных исследований перехода микроэлементов молока в молочную сыворотку, полученных с помощью лабораторного реактора ТПУ [263]: Na_2O – 100%, Mg – 100%, K_2O – 100%, Cl – 96%, Ca – 82%, а также следующие ультра- и микроэлементы: B – 716,9 мг/кг; Zn – 190 мг/кг; Cr – 41,3 мг/кг; Rb – 18 мг/кг; Sr >15 мг/кг; Ba >10 мг/кг; Co – 0,49 мг/кг; Hf – 0,33 мг/кг; Au – 0,2 мг/кг; Fe – 0,17 мг/кг; Ca > 0,1 мг/кг; U > 0,1 мг/кг; Eu – 0,1 мг/кг; Sb – 0,03 мг/кг; Ta – 0,03 мг/кг; Sm – 0,065 мг/кг; Th – 0,013 мг/кг.

Молочная сыворотка по результатам исследований на лабораторном реакторе ТПУ включает такие соединения, как CaCl_2 ; $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$; KCl ; $\text{K}(\text{H}_2\text{PO}_4)$; $\text{KC}_3\text{H}_5\text{O}_3$; K_2CO_3 ; $\text{K}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)$; MgHPO_4 ; $\text{Mg}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, NaCl ; Na_2CO_3 ; $\text{Na}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)$ и пр. Полученные значения согласуются с результатами исследований А. Г.

Храмцова [275]. Однако имеются отличия, которые можно объяснить отличием технологии производства продукта и образования молочной сыворотки, а также отличием состава исходного сырья от исследованного А. Г. Храмцовым.

Молочная сыворотка содержит жиро- и водорастворимые витамины. По их составу и количественному содержанию молочную сыворотку можно отнести к биологически ценным продуктам (таблица 1.4). Витамины переходят в сыворотку из исходного сырья, при этом их содержание зависит от технологии производства конечного продукта. В процессе хранения содержание витаминов в молочной сыворотке снижается.

Таблица 1.4 – Содержание витаминов в сыворотке

Сыворотка	Содержание витаминов, мкг/кг								
	Каротин	А	Е	В ₁	В ₂	В ₆	Холин	РР	С
Подсырная	13	22	227	315	1389	524	160000	140	500
Подтворожная	75	110	315	263	1107	478	140000	140	500

Молочная сыворотки богата различными кислотами. Так, она содержит лимонную, молочную, нуклеиновую органические кислоты, масляную, уксусную, пропионовую, муравьиную, жирные кислоты. Также в молочной сыворотке присутствуют ферменты фосфорилазы и гидролазы, ферменты изомеризации переноса и расщепления.

Средняя плотность молочной сыворотки составляет (1022-1027) кг/м³ при температуре 20°C. Зависимость плотности от температуры показана зависимостью (1.1), которой можно пользоваться в диапазоне (20–50)°C.

$$\rho = 0,17T + 1027,58 \quad (1.1)$$

где: ρ – плотность, кг/м³;

T – температура, °C.

На значение данного показателя практически не влияет вид вырабатываемого продукта.

Динамическая вязкость молочной сыворотки также подвержена влиянию температур, что отражает формула (1.2):

$$\mu = 1,53 \lg T + 3 \lg T + 3,32 \quad (1.2)$$

где: μ – динамическая вязкость, МПа/с;

T – температура, °С.

Зависимость (1.2) описывает изменение вязкости молочной сыворотки в интервале (20, –50)°С.

Сыворотка кипит при нормальном атмосферном давлении и температуре 101,5°С, замерзает при (0,6, –0,75)°С. Значение данных показателей примерно одинаково, но отличается для разных видов молочной сыворотки (творожная, подсырная).

Показатель поверхностного натяжения меньше на треть по сравнению с водой и составляет $(40-45) \cdot 10^{-3}$ Н/м при температуре (20-45)°С. Это объясняется тем, что в составе молочной сыворотки присутствуют белковые соединения, которые выполняют функцию поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Водородный показатель pH сыворотки варьируется от 4,4 до 6,3. Повышение значения pH приводит к снижению содержания лактозы в молочной сыворотке в связи с образованием фермента лактаза, который производится бактериями в результате их жизнедеятельности.

1.2 Основные направления переработки молочной сыворотки

В результате литературного обзора по теме диссертационного исследования установлены главные направления переработки и использования молочной сыворотки:

- использование молочной сыворотки в натуральном виде;
- получение концентратов молочной сыворотки;
- выделение и использование отдельных наиболее ценных компонентов;
- биопереработка.

В соответствии с целями диссертационного исследования выбраны два первых направления из представленных.

Использование молочной сыворотки в натуральном виде. Выбор направления использования сыворотки без каких-либо видов переработки обусловлен отсутствием дополнительных затрат – материальных, энергетических, трудовых и т.д. При этом ценность молочной сыворотки за счет присутствия в ней питательных и биологически важных компонентов сохраняется. На основе натуральной молочной сыворотки, как правило, вырабатываются напитки, например, с добавлением ягодных, фруктовых и овощных соков.

Молочная сыворотка – продукт не долговечный, т.е. возникает необходимость введения в нее добавок, позволяющих сохранить ее полезные свойства в период транспортировки и хранения. Как правило, чаще всего в качестве консервантов используются формалин, хлористый натрий, перекись водорода. Динамика кислотности молочной сыворотки в зависимости от способа консервирования представлена на рисунке 1.2. Следует отметить, что формалин и перекись водорода не используются в пищевом производстве. Хлористый натрий можно использовать в качестве консерванта, если потом молочная сыворотка используется как компонент при производстве хлебобулочных изделий.

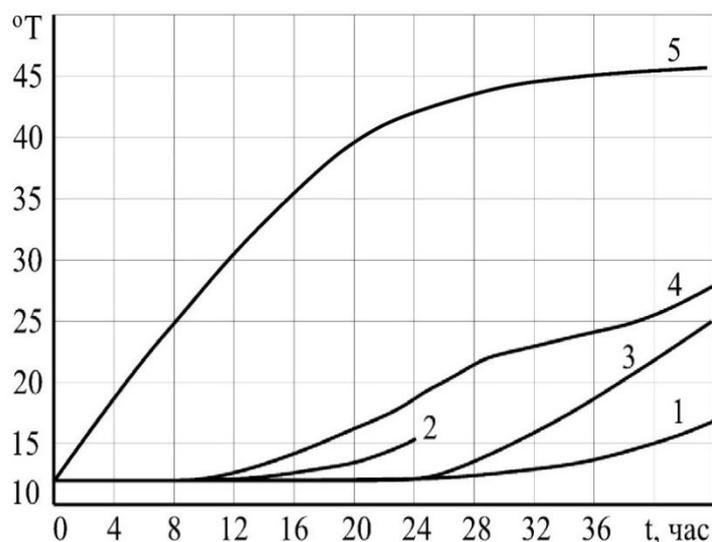


Рисунок 1.2 – Изменение титруемой кислотности сыворотки (°E)

в процессе хранения (t, час.) при различных способах консервирования:

1 – консервирование 0,03%-м формалином; 2 – консервирование 0,01%-м перексидом водорода; 3 – хранение при 10°C; 4 – нагревание до 75°C; 5 - контроль

Наиболее простым и наименее затратным вариантом считается производство питьевой молочной сыворотки. В этом случае сыворотку осветляют, кратковременно в течение (15–20)с пастеризуют при температурах (74–76)°С, затем охлаждают до температуры (10–12)°С. Известны и другие технологии производства питьевой сыворотки, содержащей, например, ароматические или вкусовые добавки. В США популярен напиток из молочной сыворотки «Pure D'Life», который содержит растительное масло и различные наполнители [285].

В странах Евросоюза напитки из осветленной и пастеризованной молочной сыворотки также популярны. Например, в Германии технология производства напитков предусматривает использование концентратов фруктовых соков.

Широко известны примеры применения молочной сыворотки в хлебопекарной промышленности. Введение молочной сыворотки, содержащей полноценный набор животных белков, в рецептуру хлебобулочных изделий позволяет повысить их биологическую ценность, улучшить потребительские свойства. Замена воды на молочную сыворотку при активации дрожжевых микрокультур значительно сокращает продолжительность процесса брожения опары, повышает качество хлебного мякиша, улучшает органолептические показатели хлебобулочного изделия (цвет, вкус, аромат). Также использование молочной сыворотки в хлебопечении замедляет черствление хлебобулочных изделий, снижается вероятность их заболевания «картофельной болезнью», приводит к экономии муки и, что важно, значительно сокращает продолжительность технологического процесса.

Как было отмечено, потребительские свойства молочной сыворотки значительно ухудшаются со временем. Это объясняется наличием лактозы, которая со временем гидролизует под действием ферментов, присутствующих в сыворотке. Кроме того, сыворотка достаточно быстро осеменяется посторонней микрофлорой [89]. Храмцовым А. Г. [272] получены следующие микробиологические показатели молочной (творожной) сыворотки (таблица 1.5).

Молочная сыворотка часто применима при обогащении грубых кормов сельскохозяйственных животных биологически ценными компонентами, для их

смягчения, а также часто используется для выпаивания животных. Введение молочной сыворотки в корма сельскохозяйственных животных повышает их перевариваемость и усвояемость.

Таблица 1.5 – Содержание микрофлоры в сыворотке на различных стадиях

Стадии технологического процесса	Содержание в 1 мл творожной сыворотки		
	Молочнокислых бактерий	Плесеней и дрожжей	Бактерий группы кишечной палочки
Синерезис	99000	-	-
Самопрессование	204000	-	0,93
Прессование	344000	0,20	0,90
Сбор сыворотки	451200	3,08	1,67
Хранение сыворотки	1019000	56	41,90

Таким образом, использование молочной сыворотки в исходном виде сопряжено с проблемой быстрой ее переработки.

Кроме того, применение молочной сыворотки в сельскохозяйственных целях требует ее транспортировки до места размещения сельскохозяйственных животных, что создает дополнительные транспортные расходы, и, следовательно, снижает рентабельность и повышает убыточность использования молочной сыворотки на кормовые цели [16].

Получение концентратов молочной сыворотки. Основным компонентом молочной сыворотки является вода, в которой растворены все содержащиеся в ней вещества – высоко- и низкомолекулярные, минеральные и др. Содержание сухого вещества составляет в среднем 6,5% по массе. Отсюда возникает возможность получения концентратов молочной сыворотки различными методами.

Рассмотрим основные формы связи влаги с сухим веществом молочной сыворотки с позиций изучения ее как объекта гранулирования.

Современные методы концентрирования позволяют удалить значительную часть влаги. В частности, испарением может быть достигнуто содержание сухого вещества до 70% по массе. При такой концентрации обычно рассматривают связь воды с твердым телом. Главным образом, в молочной сыворотке с указанной

концентрацией сухого вещества присутствует химически связанная вода в составе, например, углеводов и других веществ. Также могут присутствовать кристаллогидраты лактозы. В процессе гранулирования такие формы связи влаги с твердым телом не нарушаются, поэтому они исключены из рассмотрения в рамках данного диссертационного исследования.

Существующими методами концентрирования молочной сыворотки [6,31,32,80,81,94,272,330] удаляется физико-химически связанная влага водного раствора. При достижении концентрации около (35–40)% сухого вещества по массе выделяются кристаллы лактозы, т.е. образуется новая поверхность для адсорбции влаги, и появляются новые формы ее связи с твердым веществом [272,301,371,380]. Дальнейшее концентрирование молочной сыворотки приводит к интенсивному образованию твердого вещества, причем скорость ее образования на практике значительно выше теоретической.

При концентрации сухого вещества в интервале (51–70)% высокомолекулярные белковые соединения образуют гели, которые тоже связывают воду.

На начальной стадии концентрирования молочной сыворотки ее можно рассматривать как многофазную жидкость, вязкость которой зависит от температуры и содержания сухих веществ. Такая зависимость может быть описана эмпирической формулой (1.3) [276]:

$$\mu = 1,87 - 3,58 \cdot 10^{-2}t + 6,4 \cdot 10^{-3}E + 6,05 \cdot 10^{-4}t^2 + 4,08 \cdot 10^{-3}E^2 - 2,30 \cdot 10^{-3}t \cdot E \quad (1.3)$$

где: E – концентрация сухого вещества, %;

t – температура, °C.

Приведенная зависимость адекватно описывает изменение вязкости в интервале температур от 20 до 60°C при содержании сухих веществ от 6,5 до 30%. При концентрациях свыше (35–40)%, как отмечалось, наблюдается процесс кристаллизации лактозы, поэтому молочную сыворотку можно рассмотреть уже как двухфазную систему, эффективная вязкость которой может быть описана зависимостями (1.4) для творожной сыворотки и (1.5) для подсырной сыворотки:

$$\mu = -58,53 + 2,7 \cdot E - 0,013 \cdot E^2 + 0,011 \cdot t \cdot E + 0,002 \cdot t^2, \quad (1.4)$$

$$\mu = \alpha e^{\beta}, \quad (1.5)$$

где: $\alpha = 4,44 \cdot 10^{-4} e^{(6,1-0,66t)t \cdot 10^{-3}}$;

$$\beta = 0,16 e^{\frac{5,75}{t}}.$$

Приведенные зависимости адекватны для $E = (40-60)\%$ и $t = (15-75)^\circ\text{C}$. В указанном интервале изменения содержания сухих веществ продолжают процессы кристаллизации лактозы и образования белкового геля. При концентрации свыше 70% молочную сыворотку можно рассматривать как твердое вещество [272]. В структуре сконцентрированной сыворотки образуется устойчивая структура, состоящая из клетчатого каркаса, который скрепляется гелеобразным слоем белковых веществ. Данная структура разрушается при внешнем механическом воздействии, и молочная сыворотка переходит в вязко-текучее состояние. При прекращении действия внешнего механического воздействия в сконцентрированной сыворотке образуется белковая структура. Молочная сыворотка ведет себя таким образом до концентрации сухих веществ 85% по массе [233,257,272].

В сыворотке до концентрации сухих веществ 85% по массе вода находится в виде сплошной среды, т.е. насыщенного раствора. Дальнейшее удаление влаги способствует образованию прочных связей между кристаллами лактозы. Такое удаление влаги называют сушкой молочной сыворотки. Подобные материальные связи (мостики) образуются при кристаллизации минеральных солей и в слое геля белковых веществ в ходе дальнейшей сушки молочной сыворотки.

Полученный концентрат молочной сыворотки хранится дольше по сравнению с натуральной молочной сывороткой, но обладает всеми ее полезными свойствами. Поэтому использование концентрата в качестве сырья при производстве напитков.

Один из примеров технологии напитков на основе молочной сыворотки предусматривает ее концентрирование и внесение консервантов растительного происхождения с целью увеличения срока хранения до 30 дней [125].

Известны технологии производства безалкогольных освежающих напитков на основе концентрата молочной сыворотки [19,21,27,32,35,39,81,84,97,110,114,124,126,207,228,245,29].

Концентрат сыворотки, очищенный от коллоидных частиц и взвесей, используется в рецептурах сладких (десертных) сиропов. Разработаны рецептуры лактогрушевого, лактомандаринового, лактоапельсинового, лактояблочного и других сиропов, а также лактокрема [317,331].

Известны зарубежные рецептуры сывороточных напитков на основе ее концентратов [354]. Например, напиток «Rivella» изготавливается на основе сиропа из концентрата молочной сыворотки с добавлением альпийских трав. Производятся «Rivella rot» – обычный напиток и «Rivella blau» – напиток для диабетиков, в котором в качестве подсластителя использован цикломат кальция.

Рецептура (Германия) слабоалкогольного напитка [321] предусматривает очищение молочной сыворотки от белка и сгущение в 3–4 раза. Прозрачность напитка повышается использованием в технологии активированного угля. Содержание спирта варьируется от 0,75 до 1,5%. Вкус напитка формируется за счет содержания фруктовых сиропов и сахара.

В Японии существует технология производства концентрата сыворотки с добавлением сахара, на основе которого производят напитки [286].

В России разработана рецептура сухого растворимого напитка «Антей» [83]. Он производится на основе ультрафильтрационного концентрата пастеризованной молочной сыворотки с добавлением натуральных фруктово-ягодных или иных ароматических наполнителей. Подготовленный таким образом порошок может смешиваться с пищевыми кислотами, свекловичным сахаром и т.д.

Известен патент США [365], описывающий технологию производства сухого концентрата молочной сыворотки с массовой долей влаги 15%, предполагающий дальнейшее его смешивание с кунжутным семенем в

соотношении 2:1. Вместо кунжутного семени может быть добавлен какой-либо искусственный наполнитель, имитирующий вкус и запах фруктового сока. Подготовленный порошок используют для производства растворимых напитков.

Концентрирование (или сгущение) молочной сыворотки – один из способов комплексного использования ее компонентов [272,364]. Также сгущение молочной сыворотки до высоких концентраций сухого вещества позволяет значительно сократить ее объем, что снижает затраты на перевозку. Кроме того, концентрирование молочной сыворотки позволяет повысить срок ее хранения. Концентрирование является необходимой технологической операцией перед сушкой сыворотки, также присутствует в технологии производства молочного сахара, сиропов и др.

Удаление влаги из молочной сыворотки возможно несколькими способами. Среди них различают гиперфильтрацию (обратный осмос), вымораживание и выпаривание. Наиболее распространен способ выпаривания (или сгущения), который предполагает удаление (испарение) влаги из молочной сыворотки в процессе ее кипения. Процесс вымораживания (криоконцентрирования) [210] менее энергозатратен по сравнению с выпариванием. Также перспективным направлением является концентрирование молочной сыворотки с помощью обратноосмотических мембран [272].

Степень концентрирования молочной сыворотки определяется технологией изготавливаемого из нее продукта. При выработке молочного сахара сыворотку сгущают в 10 раз. Технология распылительной сушки молочной сыворотки предполагает сгущение в 7–9 раз. Для пленочной сушки достаточно степени сгущения в 3–5 раз. Степень концентрирования молочной сыворотки определяется также удобством использования и техническими характеристиками выпарных аппаратов [31,28,229,328].

При повышении концентрации сухого вещества молочной сыворотки до (35-40)% по массе наблюдается устойчивая зависимость вязкости раствора от скорости деформации. Также возрастает влияние гелеобразования и присутствие молочной кислоты [272].

Концентрированная молочная сыворотка обладает пастообразной или текучей консистенцией в зависимости от содержания сухого вещества. В таком виде ее можно хранить в герметичной таре, она хорошо поддается транспортировке на длительные расстояния, например, в автоцистернах, легко перекачивается насосным оборудованием.

При температурах (60–70)°С концентрированная до 65% сухого вещества по массе молочная сыворотка сохраняет текучесть, что дает возможность бестарного хранения и транспортировки. При содержании сухого вещества свыше 65% по массе возникают трудности с извлечением концентрата молочной сыворотки из выпарного аппарата. При ее охлаждении протекает процесс кристаллизации лактозы, консистенция молочной сыворотки становится пастообразной.

В диапазоне возможных концентраций сухого вещества молочной сыворотки выделены следующие критические точки: 13, 20, 30, 40, 60 и 75%.

Основные технологические переменные, контролируемые в процессе концентрирования (сгущения) молочной сыворотки – температура процесса и его продолжительность. Белковые соединения в составе молочной сыворотки весьма термолабильны. С целью сохранения их нативных свойств не рекомендуется превышение температуры процесса сгущения молочной сыворотки выше (50–60)°С.

Установлены сроки хранения сгущенной молочной сыворотки: до 60% по массе – не более 6 месяцев, до 40% по массе – не более 10 дней. Одно из условий хранения – относительная влажность воздуха не должна превышать 85%. Также срок хранения напрямую зависит от температуры окружающей среды. Так, при температуре $8\pm 2^\circ\text{C}$ сыворотка с концентрацией сухих веществ 13% по массе хранится не более 3 суток, с концентрацией 20% – не более 5 суток, 30% – не более 10 суток. Сроки хранения молочной сыворотки с указанным содержанием сухих веществ при температуре $20\pm 2^\circ\text{C}$ соответственно снижаются до 24 ч, 2 и 5 суток [272].

Основные характеристики сгущенной молочной сыворотки: внешний вид – текучая густая масса, возможно выпадение осадка в виде кристаллов молочного

сахара; цвет – однородный, светло-желтый, иногда зеленоватый оттенок; вкус – сладковато-кислый, кисломолочный, иногда солоноватый, без посторонних привкусов; запах – кислый, сывороточный.

Сухая молочная сыворотка. Наиболее полное удаление влаги из молочной сыворотки с сохранением состава сухого вещества может быть достигнуто путем сушки. Сухая молочная сыворотка производится в промышленных масштабах и может храниться независимо от условий окружающей среды неограниченный срок. По мнению экспертов Международной молочной федерации, сушка – наиболее целесообразное и перспективное направление переработки молочной сыворотки.

Существуют два способа промышленной выработки сухой молочной сыворотки – пленочная и распылительная сушка [21,73,75.109,126,134,206,240,272,298,326,334]. Остальные способы сушки, такие как терморadiационная или сублимационная, а также их комбинация, не получили развития в промышленных масштабах.

Рассмотрим особенности пленочной и распылительной способов сушки. Для пленочной сушки характерно использование сушильных аппаратов простой конструкции, имеющих небольшие размеры. Однако их эффективность достаточно высока. Недостаток данного способа заключается в том, что конечный продукт (сухая молочная сыворотка) характеризуется низкой растворимостью и имеет неприглядный товарный вид из-за наличия комочков.

Распылительным способом может быть получена сухая молочная сыворотка высокого качества. Данный способ применим в промышленных масштабах. Однако сушильные аппараты, реализующие распылительную сушку, имеют большие размеры и, соответственно, требуют значительных энергетических затрат.

Перед переработкой молочной сыворотки в сушильных аппаратах необходимо ее предварительное концентрирование. Установлено, что содержание сухих веществ в молочной сыворотке перед распылительной сушкой должно быть доведено до (35–40)% по массе, перед пленочной сушкой – до (15–22)% по массе,

в случае пенной сушки – до 45% по массе, в случае сушки на инертных носителях – до 50% по массе [327].

Способ и технология сушки зависят от кислотности молочной сыворотки. Критическим значением кислотности исходной сыворотки является 20°Т, концентрированной – 100°Т. Превышение кислотности подсырной или творожной сыворотки выше 20°Т при пленочном способе сушки препятствует ее высыханию при нанесении на барабан сушильного аппарата. Готовый продукт снять с барабана весьма затруднительно. При распылительной сушке кислой подсырной или творожной сыворотки готовый продукт налипает и остается на стенках сушильных башен аппаратов.

Возможна интенсификация процесса сушки молочной сыворотки путем внесения наполнителей до 5% по массе [31,227,240]. В качестве таких наполнителей могут быть использованы различные виды муки (соевая, пшеничная, костная и др.), отруби и т.д. Экспериментально установлено, что внесение наполнителей позволяет улучшить производительность сушильных аппаратов, стабилизировать показатели процесса сушки и переработать молочную сыворотку с большими значениями кислотности [240].

По материалам монографии «Молочная сыворотка» академика А. Г. Храмова могут быть обозначены следующие перспективные направления переработки сыворотки:

1. Потребление молочной сыворотки в исходном виде, без дополнительной обработки, а также приготовление на ее основе напитков, сыров, белковых продуктов, десертов, например, желе, сливочного масла и пр.

2. Приготовление полуфабрикатов на основе молочной сыворотки, их использование в различных отраслях пищевой промышленности, например, хлебопекарной.

3. Приготовление мороженого на основе сыворотки, ее концентратов, выделенных компонентов и производных в качестве альтернативы сухого молока и сахарозы.

4. Использование молочной сыворотки, ее концентратов, выделенных из нее компонентов и производных в рецептурах детского питания. Так, молочная сыворотка, содержащая незаменимые сывороточные белки и лактозу, обогащенная казеином и молочным жиром, может рассматриваться как альтернатива женскому молоку. Молочная сыворотка в данном случае должна быть подвергнута очистке от минеральных солей и обогащена цельным или обезжиренным молоком, сахарозой, витаминами. Полученная молочная смесь подвергается сначала сгущению, затем сушке.

5. Молочная сыворотка в исходном виде или ее концентрат могут быть использованы в сельскохозяйственных целях при производстве кормовых смесей для животных.

6. Производство гранулированных кормовых смесей сельскохозяйственных животных на основе сыворотки и ее концентратов в промышленных масштабах. Гранулированный корм имеет сбалансированный состав, может быть заготовлен впрок. Благодаря повышению обменной энергии корма на 5–7% за счет внесения добавок, обеспечивается его полная поедаемость животными. Молочная сыворотка в исходном виде, а также сконцентрированная и сгущенная, рассматривается как источник обогащения кормовых смесей, с одной стороны, и как средство обеспечения лучшей спекаемости гранул, особенно при холодном гранулировании, с другой стороны.

В настоящее время ведутся исследования по направлениям разработки новых рецептур на основе молочной сыворотки, изучаются и совершенствуются процессы агломерации и сушки с позиции снижения энергетических затрат и повышения качества готового продукта, в том числе за счет внесения различных наполнителей и обогатителей.

Гранулирование – современный способ обработки молочной сыворотки, позволяющий получить сконцентрированный продукт с сохранением полезных компонентов исходного сырья. В процессе гранулирования молочной сыворотки могут быть применены иные, не рассмотренные выше, способы сушки, например,

конвективная сушка. Такой способ применим в случае влагоемких носителей, в частности, соевой муки, крахмала, комбикорма и т.п.

В последнее время складывается устойчивая тенденция перехода от переработки сырья в порошковые смеси к формованию брикетов, таблеток, гранул. Такой способ переработки позволяет использовать различные виды тары и упаковки для хранения продукта, увеличить срок хранения, а также допускает дополнительное обогащение исходного сырья полезными добавками. Таким образом, гранулирование молочной сыворотки становится в настоящее время перспективным способом ее переработки.

Установлено, что размер гранул продукта в интервале (0,5–5) мм и их плотная структура в значительной степени снижает скорость их переваривания пищеварительным трактом человека, что оказывает положительное воздействие на весь пищеварительный процесс [194].

Таким образом, можно заключить, что гранулирование – перспективный способ переработки молочной сыворотки в сухой концентрат, наиболее приемлемый для предприятий малой и средней мощности.

1.3 Особенности технологий гранулирования сыворотки

Выбор способа гранулирования обусловлен многими факторами, в первую очередь, назначением конечного продукта и целью гранулирования.

Одним из примеров назначения гранулирования молочной сыворотки является снижение слеживаемости гранулята. Сушка, как правило, в данном случае осуществляется в сушильных аппаратах конвективного типа. Внешний вид полученных гранул не является важным показателем технологического процесса, так как гранулят используют в качестве полуфабриката. Следовательно, наиболее приемлем способ формирования гранул экструзией. Экструдированию подвергается концентрат молочной сыворотки с содержанием свыше 70,5% сухих веществ по массе. Внимание при этом нужно обратить на тексотропные свойства концентрата, которые выражаются в его способности проявлять свойства

твердого тела без внешнего воздействия и текучего вещества под внешним воздействием. В результате экструдирования концентрата молочной сыворотки образуются жгуты (или «стренги») [234], повторяющие форму выпускных отверстий экструдера. Поверхность жгута получается гладкой при соблюдении технологических параметров процесса экструзии. Жгут на выходе экструдера обрезают режущим элементом – струной или ножом. Известен способ подсушивания цельных жгутов с последующим их измельчением в гранулы.

Недостатками данного метода получения гранулята молочной сыворотки являются:

1. Высокая энергетическая емкость процесса экструдирования, создание высоких давлений, необходимых для прохода концентрата сквозь отверстия экструдера.

2. Значительная продолжительность процесса экструдирования в связи с длительным переходом концентрата молочной сыворотки из одного тиксотропного состояния в другое, т.е. изменение свойств, характерных для твердого тела и текучего состояния.

3. Низкая степень растворимости гранул из-за высокой плотности концентрата сыворотки.

Однако высокую плотность концентрата сыворотки, который подвергается экструзии, и низкую степень растворимости полученных гранул можно отнести и к достоинствам гранулята.

С одной стороны, высокая плотность концентрата молочной сыворотки снижает интенсивность процесса удаления влаги с поверхности гранул, но, с другой стороны, на поверхности жгута и гранул образуется достаточно твердый слой, который сохраняет их форму и препятствует слипанию при транспортировке по технологическому тракту. Низкая степень растворимости полученного гранулята, с одной стороны, требует дополнительного времени для размачивания, но, с другой стороны, такой гранулят не отсыревает, дольше хранится и менее подвержен негативному воздействию со стороны бактерий и микроорганизмов.

Процесс получения жгутов из концентрата молочной сыворотки с высоким содержанием сухих веществ возможен с применением вальцового или экструзионного технологического оборудования. При этом следует помнить, что высокие давления, необходимые для проталкивания сырья сквозь выпускные отверстия аппаратов, создают зону повышенной температуры. Это приводит к снижению качества и пищевой ценности полученного гранулята.

В разделе 1.2 описан способ сушки концентрата молочной сыворотки распылением в свободном объеме сушильного аппарата. Данный способ теоретически обоснован и имеет практическое применение, однако труднореализуем по некоторым причинам. Во-первых, предъявляются требования к кислотности перерабатываемой сыворотки, которая должна составлять менее 60°Т. Во-вторых, сыворотка в процессе переработки налипает на стенки башни и разгрузочного устройства сушильного аппарата, тем самым снижая эффективность технологического процесса. Полученный таким способом гранулят содержит гранулы размером (0,1–0,4) мм, имеет, с одной стороны, хорошую растворимость, с другой стороны – низкую насыпную плотность и высокую слеживаемость.

Из практики гранулирования известен способ окатывания гранул, который характеризуется наименьшими энергетическими затратами. Однако способ при гранулировании молочной сыворотки не применялся.

Технология гранулирования рассматривает выпаривание (сгущение) молочной сыворотки и сушку полученного концентрата как подготовительные этапы.

Физико-химические и физико-механические характеристики молочной сыворотки определяются содержанием в ней белковых соединений, молочного сахара, молочного жира и минеральных компонентов. Присутствие остальных компонентов (таблица 1.4) незначительно, поэтому их можно исключить из внимания при исследовании процессов структурообразования дисперсной системы. Тем не менее, их влияние на функциональное назначение продуктов, вырабатываемых из молочной сыворотки, значимо.

Гранулирование молочной сыворотки осуществляется в присутствии порового вещества, свойства которого в значительной мере влияют на динамику процесса гранулообразования и прочность полученных гранул. В качестве порового вещества может быть использован концентрат сыворотки с высоким содержанием сухих веществ, который вносится в объем сыворотки, подвергаемой гранулированию, в виде сухого порошка.

Важной характеристикой сыворотки, определяющей ее способность образовывать прочные механические связи, является влагосодержание. При низком влагосодержании (ниже 25%) и низких температурах процесса гранулирования (ниже 10°C) [272] в растворе сыворотки образуется блок в результате кристаллизации лактозы и перехода части свободной влаги в кристаллогидраты, а также в связи с гелеобразованием белковых соединений. Высокомолекулярные белковые вещества содержат ионизирующие группы, поэтому обладают свойствами полиэлектролитов, и, кроме того, проявляют свойства, характерные для коллоидно-химических систем.

1.4 Системный анализ технологических процессов производства гранулированных продуктов: механизм и основные закономерности

В диссертационном исследовании выполнен анализ существующих на данный момент технологий производства быстрорастворимых гранулированных напитков (БГН) и их аппаратного оформления. Цель анализа заключается в формировании классификации методов инстантирования, процессов структурирования полидисперсных многокомпонентных систем, а также процессов и технологий структурирования окатыванием.

Установлено, что на данном этапе развития технологий производства БГН разработаны математические модели технологических процессов, выполнен синтез технологических потоков производства напитков на основе концентратов молочной сыворотки с добавлением плодово-ягодного сырья. Качество БГН определяется, главным образом, подсистемой формирования коагуляционной

структуры и подсистемой, которая обеспечивает коагуляционно-конденсационно-кристаллизационное структурообразование при удалении влаги в процессе сушки.

Основную роль в создании первичной структуры влажных гранул играют капиллярно-молекулярные силы [9,18,23,24,91,108,136,230,320,356]. Скорость процесса коагулирования дисперсных масс напрямую определяется скоростью агломерирования (или зародышеобразования). Выявлены основные показатели качества влажных гранул и готового продукта. На основании эмпирических данных о производительности гранулятора и качестве гранулята предложены модели оценки их взаимосвязи, позволяющие также установить ее связь с системной технологией. Моделирование основных закономерностей процесса гранулирования позволило выполнить расчет аппаратного оформления технологического процесса, создать технологию гранулирования, а также усовершенствовать операторную модель подсистемы формирования влажной гранулы. Производительность грануляторов и показатели качества гранулята повышены в 3–5 раз.

Приложение закономерностей системного подхода к изучению подсистемы формирования конденсационно-кристаллизационной структуры гранулы позволяет увидеть тонкие места, характеризующиеся снижением ее прочностных характеристик на этапе динамического процесса перестройки структуры дисперсной системы. Анализ характера влияния внешних воздействий на тепло- и массообменные процессы, проходящие при сушке, позволил определить инновационный путь решения. Предполагается использование «спутника – сухого гигроскопичного порошка», который поглощает свободную влагу.

В результате создана система управления технологическими процессами гранулирования, которая успешно апробирована в условиях промышленного производства традиционных гранулятов, позволяющая создавать новые виды продуктов на основе, например, творожной сыворотки.

Представленный материал по теме диссертационного исследования показывает, что вопрос производства быстрорастворимых (instant) пищевых продуктов изучен недостаточно. Конечно, существуют эмпирические частные

решения вопроса, однако на данный момент нет комплексного системного исследования теоретических основ и аппаратного оформления инстантирования, не исследованы вопросы его экономической эффективности и энергетической емкости.

Результаты моделирования процесса производства быстрорастворимых пищевых продуктов позволяют провести обоснованный выбор аппаратного оформления технологического потока.

В настоящее время технологии производства БГН развиваются стремительно [5,73,75,133,134,231,349]. В основу систематизации существующих технологий положены принципы, которые необходимо учитывать при проектировании технологических потоков.

Главный принцип заключается в многокритериальности решаемых проблем, возникающих при создании новых и модернизации существующих технологических потоков. Критериальная оценка альтернатив с целью их выбора является одним из важных этапов системного анализа проблемы. Как правило, невозможно сравнить альтернативы на основании одного критерия, например, растворимости гранул или их пористости. Также возникает трудность с учетом всех критериев, которые влияют на принятие решения о выборе альтернативы, т.е. некоторые важные критерии могут быть упущены из внимания. Кроме того, возникает вопрос о сравнении различных по своей сути критериев, например, как сравнить критерии, характеризующие органолептические качества гранулята и его физико-механические свойства (растворимость, пористость, увлажняемость, прочность и др.).

Всегда при выборе альтернатив присутствует субъективное мнение эксперта, проводящего системный анализ.

В связи с этим оптимальность выбора поставлена под сомнение. Конечно, выходом из сложившейся ситуации является оценка группы экспертов, специализирующихся, например, по оценке органолептических характеристик пищевых продуктов. Выбор становится проще, если вопрос системного анализа уже изучен и имеется достаточное и систематизированное количество патентов,

публикаций, изданий, которые помогают специалистам по разработке технологических потоков справиться с решением проблемы, сделать ее более структурированной, понятной и прозрачной.

Одной из важных задач, решаемых при системном исследовании, является более детальная структуризация решаемой проблемы. Ниже приведены основные методы повышения степени структуризации.

Закономерности функционирования и развития технологического потока необходимо учитывать на всех этапах системного исследования, в частности, при формировании научного и технико-экономического обоснований, составлении технического задания. На указанных этапах необходимо также учесть возможность и направления модернизации производства и, в случае необходимости, возможность перепрофилирования. Кроме этого, принимают во внимание уровень квалификации персонала, возможность изменения количества и качества исходного сырья и пр. При исключении какого-либо, на первый взгляд незначимого, фактора, реализация проекта может оказаться бессмысленной. В последнее время особое внимание уделяется предпроектным решениям, в том числе экологическим.

Сложность и многообразность структуры технологического потока напрямую влияет на уровень затрат на его моделирование, разработку и апробацию в режиме эксплуатации. Законы функционирования новой технологии производства тоже будут новыми [213,218,242]. В связи с этим разработку системы машин технологической линии необходимо проводить на основе реализуемой на ней технологии производства.

Несомненно, что поведение производства пищевых продуктов во всем своем многообразии может быть представлено лишь комплексом целостных систем. Объектом изучения, в первую очередь, будет являться структура системы, состоящая из взаимосвязанных подсистем или элементов, а также характер и закономерности взаимосвязей, объединяющих элементы и подсистемы в единое целое, и, конечно, интегративные закономерности. Комплекс систем предполагает

наличие в нем двух и более целостных систем, т.е. комплекс систем можно назвать полисистемным.

Системная методология предполагает последовательное движение от технологии к системе процессов и далее – к системе машин. Но, как показывает практика, наиболее наукоемким считается система процессов [217,240].

Решение задачи системного анализа предполагает выполнение двух основных этапов – рассмотрение проблемы в совокупности со смежными проблемами, т.е. переход от проблемы к системе проблем, и системное проектирование, включающее этапы системного исследования, направленные на решение поставленной системы проблем.

В состав системного рассмотрения входят:

- формирование проблемы (системы проблем);
- изучение (исследование) проблемы (системы проблем);
- выявление проектируемого объекта;
- выявление параметров проектируемого объекта, подлежащих контролю, и ограничений, накладываемых на них.

В состав системного проектирования входят:

- моделирование проектируемого объекта;
- выявление оптимальной структуры проектируемого объекта;
- оптимизация параметров проектируемого объекта;
- формирование перечня требований, предъявляемых к компонентам в составе проектируемого объекта;
- построение алгоритма разработки технологического потока с учетом специфики каждого этапа производства вырабатываемого продукта.

Центральную проблему системного исследования можно сформулировать как получение сухого быстрорастворимого продукта пищевого назначения с сохранением его нативных свойств, характеризующегося хорошей сыпучестью, длительным сроком хранения и простой технологией производства.

Наиболее точное и полное формулирование системной проблемы – половина пути к успешному ее решению.

Обратимся к изучению процессов, протекающих в аналогичных полидисперсных системах, имеющих место быть в различных отраслях промышленности: пищевой [105,216], химической [74,100,104,338], сельскохозяйственной [215], металлургической [25,339] и т.д. Системная проблема уточняется с учетом изложенных в них, научно-обоснованных положений, т.е. можно обозначить возможные направления развития структурообразования в дисперсных системах. Далее могут быть поставлены (или конкретизированы) цели, достижение которых позволит, так или иначе, решить проблему создания быстрорастворимых напитков (БН).

Актуальной задачей современного этапа развития пищевой науки становится производство дисперсных систем с заранее заданными свойствами, что обуславливает и их определенное качество. В рамках этого направления может быть сформулирована задача производства быстрорастворимых напитков с определенными характеристиками. Решение задачи может быть достигнуто за счет изменения структуры дисперсной системы, размеров ее частиц, физико-химических свойств сырья.

Иными словами, любой порошковый продукт может быть преобразован в быстрорастворимый путем изменения его физических свойств. При этом такой продукт нужно рассматривать с позиций инстантирования, учитывая те специфические свойства, которыми он обладает. Пищевые продукты, нерастворимые в воде, могут быть преобразованы в быстродиспергируемые сыпучие продукты также путем модификации их физических свойств [231,293-297]. Примерами нерастворимых в воде пищевых продуктов являются мука и различные хлебопекарные и кондитерские порошки. Применительно к ним определение «инстант» будет означать, что тесто на их основе готовится быстрее, характеризуется пониженной клейкостью. Готовый продукт в этом случае будет иметь более рассыпчатую структуру.

Инстантирование конечного продукта с высокой степенью надежности достигается использованием в технологии его производства увлажняемых пищевых порошкообразных полидисперсных сред и их агрегатированием.

Следующим этапом системного исследования является обоснованный выбор увлажняющей порошкообразной добавки. Выбор обосновывается результатами исследований, проведенных на предыдущем этапе. Рассмотрим выбор добавки на примере киселя. В данном случае в качестве такой добавки может быть предложен картофельный крахмал или сахарная пудра. Жидкой фазой, выполняющей роль увлажняющей суспензии, может являться молочная сыворотка, концентрированные ягодные и фруктовые соки. Структуру гранулы составляет каркас из грубодисперсной среды, например, крахмала и мелкодисперсных сред, например, сахара или шрота плодово-ягодного сырья. Такой вывод сделан на основе результатов этапа разработки предпроектных решений, которые подробно представлены в исследованиях [140-193].

Данный этап проектирования заключается в выборе способа формирования структуры и размера гранул, времени растворения (диспергирования), их контроля. Также на данном этапе может быть ориентировочно оценено качество конечного продукта. Однако данный этап не дает представления о конкретной технологии производства продукта. Поставлена задача формирования гранул и сформулированы требования к их размеру и структуре, а также разрабатываемым рецептурам. Таким образом, на данном этапе сформулированы требования ТУ, ТЭР и ТЗ.

Свойства БГН определяются не только свойствами компонентов, входящих в их состав, и их соотношением, но и структурой гранул. Основные характеристики, которыми могут быть описаны гранулы в составе гранулята исходной смеси, это характер и сила взаимосвязей частиц, которые образуют гранулу, а также их размеры и количество в грануле, объем, пористость, геометрические размеры самой гранулы, ее способность поглощать влагу.

Важным параметром является пористость дисперсного материала гранулы. Она определяет степень растворимости и увлажняемости, а также характеристики массо- и теплопередачи. Определение степени пористости гранулы – важный шаг к пониманию физико-механических и физико-химических процессов, происходящих в гранулированном продукте.

В грануляте имеют место коллоидно-химические процессы, скорость и динамика протекания которых определяется изменением свойств дисперсной системы гранулы. Изменение кислотности среды, например, влечет за собой изменение заряда поверхностных частиц гранулы, а, следовательно, меняются закономерности формирования структуры гранул [236,263]. Поэтому предварительный этап исследования свойств гранул является необходимым с точки зрения получения гранулята с хорошей растворимостью.

В технологии производства БГН часто используется операция агломерации либо в качестве отдельного этапа процесса производства, либо в сочетании с внесением пищевых добавок, позволяющих изменить физико-химические свойства гранулята. Агломерация как технологическая операция имеет свои технологические особенности и предъявляет конструктивные требования к аппаратному оформлению. Способ проведения агломерации зависит от заданных свойств конечного продукта с учетом оптимальных значений технико-экономических показателей производства.

1.5 Метод и методика системного анализа

Системный анализ представляет собой часть системного исследования и состоит из процедур определения взаимосвязей между элементами исследуемых систем. Основу системного анализа составляют математические, общенаучные, статистические, естественнонаучные и экспериментальные методы [220]. Центральная задача системного анализа – проблема принятия обоснованного решения в условиях множественности альтернатив развития исследуемой системы и ее взаимодействия с окружающей средой.

Основные аспекты системного анализа изучены В. Н. Афанасьевым, В. Р. Носовым, В. Б. Колмановским. и представлены в работе [220,242]. Рассмотрим их более детально:

- системно-элементный аспект определяет состав компонентов исследуемой системы;

- системно-структурный аспект описывает структуру исследуемой системы в виде взаимосвязей ее элементов;
- системно-функциональный аспект раскрывает функции исследуемой системы, ее элементов и подсистем;
- системно-коммуникационный аспект определяет характер и особенности горизонтальных и вертикальных (иерархических) связей исследуемой системы с другими системами;
- системно-интегративный аспект показывает механизмы и направления функционирования и развития исследуемой системы;
- системно-исторический аспект характеризует этап возникновения исследуемой системы, динамику и перспективы ее развития.

Системный анализ применим при комплексном и всестороннем исследовании объекта проектирования. Системный анализ как этап системного исследования базируется на принципах, изложенных в общей теории управления и исследования операций [3,12,106,130,214,326]. Изучение и проектирование сложных систем сопряжено со следующими особенностями. Цели системного исследования должны быть четко определены и сформулированы. Исследуемая система должна быть описана конечным набором показателей и характеристик. Необходимо выбрать шкалу сравнительной оценки показателей, характеризующих исследуемую систему. В связи с этим исследуемые сложные системы представляются в системном исследовании в виде математических моделей.

В России методологию системного исследования определили работы В. Н. Беклемишева, А. А. Богданова, И. И. Шмальгаузена и других исследователей. Сторонниками этих исследований также являются зарубежные исследователи А. Раппопорт и К. Боулдинг.

Теория систем развивалась, благодаря исследованиям академика В. И. Вернадского. В 40–50-х годах прошлого века были заложены основы кибернетики как науки, изучающей процессы передачи информационных сигналов и сигналов управления в сложных системах. Наиболее известны работы Н. Винера

(«Кибернетика») [130,204,220] и У. Росс Эшби («Введение в кибернетику») [326,338]. Н. Винером сформулировано следующее определение кибернетики – это исследование «связи и управления в животном и машине». Таким образом, заложены универсальные принципы исследования информационного обмена вне зависимости от природы изучаемых систем. Подход Н. Виннера поддержал К. Шеннон в своих работах, посвященных математическому исследованию информации [14,130]. В 60-х годах прошлого века М. Месарович сформулировал постулаты теории систем. Более подробно они изложены в работе [200]. Позднее математический аппарат теории систем был расширен за счет дифференциальных уравнений и теории конечных автоматов. Таким образом, теория систем приобрела современный вид [38, 200,202].

Таким образом, наука о сложных системах базируется на общесистемных исследованиях, постулатах кибернетики и математическом аппарате теории систем [14,220].

Системный подход можно определить как совокупность комплексного анализа, системного моделирования и системного управления. Методология системного подхода предполагает разработку адекватных математических моделей исследуемых систем и применении методов поиска оптимальной стратегии управления их поведением [242].

1.6 Эволюция представлений о моделировании в производстве многокомпонентных полидисперсных пищевых концентратов

Системное проектирование технологических потоков производства быстрорастворимых полидисперсных пищевых концентратов базируется, главным образом, на результатах экспериментальных исследований, их обобщении и систематизации. Кроме того, учитывается современный уровень развития технологий производства быстрорастворимых полидисперсных пищевых концентратов и предъявляемые требования к качеству конечного продукта. Одновременно происходит становление и развитие основополагающих принципов

методологии процедуры синтеза в составе системного подхода. В научной литературе принято выделять следующие этапы эволюции технологии композиционных пищевых гранулированных продуктов [7,79,85,88,95,99,141,147,160,163,164,168,169,190,200,264].

Первый (начальный) этап – возникновение новой (инновационной) технологии. На данном этапе происходит формирование начального объема эмпирических данных о технологии производства. Технология складывается из отдельных рецептур (так называемый «рецептурный подход») методом «проб и ошибок». Управлять технологическим процессом на данном этапе может только опытный технолог, опираясь на накопленные знания и опыт, профессиональную интуицию. Говорить о какой-либо форме математической модели технологии производства пока рано. Таким образом, основу данного этапа составляет сбор эмпирических данных с последующей их обработкой статистическими методами.

Второй этап – становление предложенной инновационной технологии производства, которое базируется на накопленном объеме данных путем его обобщения и систематизации. На данном этапе формируется представление о закономерностях, лежащих в основе технологии. Выявляются основные технологические факторы и степень их воздействия на качественные показатели и свойства конечного продукта – композиционных материалов. Происходит систематизация выявленных технологических факторов, их агрегирование в систему рецептурно-технологических факторов. Далее возможен переход от рецептурно-технологических факторов к составу исследуемой системы, от состава к ее структуре, и далее к свойствам, определяемым составом элементов и взаимосвязями между ними. Также возможно построение аналитических качественных моделей системы, например, в виде регрессионных уравнений. Исследования на данном этапе возможны с опорой на постулаты фундаментальных наук.

Третий (заключительный) этап можно охарактеризовать как этап получения устойчивой технологии производства быстрорастворимых гранулированных пищекокцентратов и выработки опытного продукта с заданными

характеристиками структуры и значениями показателей качества. Качество на данном этапе можно определить как совокупность требований технологического процесса производства и требованиям к готовому продукту и органолептических, физико-механических и физико-химических требований к его свойствам.

Отсюда вытекают два взаимосвязанных цикла технологии производства – технологический и эксплуатационный. Каждый из образующих технологию циклов предполагает оценку степени влияния совокупности управляющих воздействий на показатели качества конечного продукта. Соответственно, отслеживается отклонение значений показателей качества полученного продукта от заданных (желаемых) значений, и вносятся корректировки в рецептуру и технологические условия его производства.

Первостепенная задача заключается в идентификации конечного продукта. Она состоит в определении его структуры и свойств (физико-механических, физико-химических и др.), а также оценки его пищевой ценности. Важное место занимает идентификация назначения пищевого продукта. Кроме того, решение задачи идентификации заключается в определении характеристик внешней среды по отношению к производимому продукту и, конечно, выявлении технологических параметров, обеспечивающих заданное качество продукта на каждом этапе его производства. Процесс идентификации должен быть максимально формализован. Исследователь должен четко представлять алгоритм перебора возможных структур пищевого концентрата, правила синтеза и оценки качества каждой возможной структуры быстрорастворимых гранулированных пищевых концентратов.

Идентификация структуры продукта базируется на моделировании. Рассмотрим основные проблемы, возникающие перед исследователем на данном этапе:

– выход многомерной исследуемой системы может быть представлен в виде ковариационной матрицы. Исследователю необходимо выбрать вид этой матрицы, а также обоснованно подойти к выбору порядка дискретной

динамической модели конечного продукта и типа нелинейной модели динамического объекта;

– исследователь должен оценить достоверность результатов моделирования методами параметрической идентификации;

– необходимо осуществить переход от существующей на данном этапе идеи создания пищевого продукта к его адекватному математическому описанию;

– модель пищевого продукта должна быть идентифицируема в пространстве состояний;

– процессы структурной и параметрической идентификации должны быть автоматизированы;

– необходим обоснованный выбор вида модели нелинейной системы из общего ряда нелинейных дифференциальных уравнений с учетом входных воздействий на объект моделирования;

– исследователь должен контролировать поведение технологического объекта управления по регрессионным остаткам и пр.

Идентификация структуры нового продукта заключается в формализации постановки практической задачи и состоит из следующих моментов:

- постановка практической задачи;
- формализация постановки практической задачи;
- выбор значений формализованной постановки практической задачи;
- корректировка постановки практической задачи;
- алгоритмизация практической задачи;
- поиск пробного решения практической задачи.

Особенностью структурной идентификации сложных систем является их плохая формализуемость. Это усложняет решение задачи структурной идентификации методами математического программирования и затрудняет применение к ним методов математического моделирования в целом. Затруднительна и процедура принятия решений. Это обусловлено иерархичностью задачи идентификации. Разработка новых систем структурной идентификации остается по сей день актуальной задачей.

1.6.1 Требования к математическим моделям синтеза технологических потоков многокомпонентных гранулированных пищевых концентратов

Одним из способов решения задач на этапе структурной идентификации пищевого продукта является метод компьютерного моделирования. Перспективным направлением является создание целого класса математических моделей, которые могут имитировать процессы разработки инновационных пищевых продуктов специального назначения. Решение о возможности использования систем компьютерного моделирования принимается на основании результатов лабораторных и промышленных испытаний, подтверждающих их адекватность и достаточную для прогнозирования точность. В связи с этим, одна из задач диссертационного исследования заключается в корреляционно-регрессионной оценке эмпирических данных, разработке адекватного математического описания, прогнозирующего с необходимой степенью точности поведение исследуемого объекта.

Математическая модель быстрорастворимых полидисперсных пищевых концентратов должна быть адекватной, точной, экономичной и универсальной [89,200].

Адекватность математической модели заключается в ее способности отражать поведение объекта с заданной погрешностью. Оптимизация математической модели заключается в уменьшении интервала области адекватности, например, «законом створа» [200]. В соответствии с данным законом оптимальная структура математической модели может быть описана набором соответствующих экстремальных значений свойств, а также «законом конгруэнции» [200]. Оптимальность структуры также обусловлена наличием устойчивого соответствия между свойствами компонентов на основе различных вяжущих или общего вяжущего вещества, а также между свойствами вяжущего вещества и конгломерата на его основе. Следствием этого является зависимость изменения качества конгломерата при изменении качества исходных компонентов смеси, на основе которых образуется конгломерат. Причем зависимость

характерна как в сторону ухудшения, так и в сторону улучшения. Указанные взаимосвязи могут быть описаны детерминированными моделями при аналитическом способе моделирования, в частности, моделями прочности, упругих деформаций и т.д. Под точностью понимают сходимость значений, полученных по математической модели, и значений, определенных для гранулированных полидисперсных пищевых концентратов (КГПК). Допускаемое значение точности составляет, как правило, 10–15 %. Экономичность модели определяется затратами вычислительных ресурсов (машинного времени и памяти) на ее реализацию. Универсальность модели заключается в полноте отображения свойств КГПК. Это свойство определяет применимость математической модели для всестороннего моделирования свойств КГПК и технологического процесса производства КГПК, а также ее применимость для классов композитов специального назначения.

Требования, предъявляемые к адекватности, точности, универсальности и экономическим характеристикам противоречивы. Поэтому необходимо достичь баланса между ними с учетом специфики решаемой задачи и целей исследования. Математическая модель технологического процесса КГПК должна отражать следующие физико-химические процессы, происходящие в продукте: химические, гидромеханические, микробиологические, реологические, электрические, механические, гравитационные, диффузионные. Причем некоторые из приведенных физико-химических процессов могут протекать одновременно. При построении математических моделей технологических процессов КГПК необходимо осуществлять поэтапно и итерационно процедуру декомпозиции с учетом иерархичности моделируемых процессов, использовать их унификацию и типизацию [220].

1.6.2 Моделирование физических и технологических процессов синтеза

Основой системного исследования является математическое моделирование изучаемого объекта или процесса. Любую сложную систему, в том числе

технологическую, можно адекватно описать с помощью какого-либо математического аппарата. В этом случае модель сложной системы будет имитировать ее функционирование с принятой точностью. Математическая модель отражает принцип преобразования информации, поступающей на входы системы, в информацию, которую система передает в окружающую ее среду через выходы [177,200].

Наиболее удобным средством составления математического описания большинства сложных систем, в том числе систем, характеризующих производственные процессы, является декомпозиция. Данная процедура, применяемая в системном исследовании, предполагает разделение изучаемой сложной системы на более простые ее компоненты. Декомпозиция является основной процедурой системного анализа. Также используются процедуры параметрического анализа. Наряду с анализом широко применим системный синтез, который в зависимости от сложности и особенностей объекта исследования может включать структурный и параметрический синтез. Возможна комбинация структурных и параметрических этапов анализа и синтеза при исследовании сложной системы [105,216,240]. Структурное описание системы в совокупности с ее математическим описанием представляют собой основу формализации исследуемой системы.

Выявление сути протекающих в технологической системе процессов происходит в результате экспериментального исследования. Эксперимент может быть проведен на реальном объекте или его математической модели. Соответственно, эксперимент называют реальным или модельным [200].

Ключевым понятием моделирования исследуемых систем является подобие. Подобными можно назвать системы (или объекты) в том случае, если их основные характеристики отличны друг от друга в некоторое число раз. Различают математическое и физическое подобие объектов моделирования.

Физические процессы, имеющие место в исследуемых технологических системах, связанных подобием, как правило, схожи. Математическое подобие предполагает описание основных процессов в исследуемых системах с помощью

одного и того же математического аппарата. Известны методы программного или компьютерного моделирования как разновидность методов математического моделирования и метод натурального моделирования как разновидность физического.

При сравнении двух подобных объектов (или систем) выделяют объект моделирования (оригинал) и подобную ему математическую модель. Построение модели основано на изучении свойств объекта моделирования. Процессом моделирования называют воспроизведение моделью процесса функционирования объекта. Другими словами, модель объекта – это его копия, отражающая основные его свойства, воспроизведение которых способствует решению задачи системного анализа. Математическая модель – модель объекта, представленная в виде математических выражений, описывающих функционирование объекта по качественным и количественным показателям [240,242].

Основное назначение математической модели – проведение исследований свойств объекта, исключаящие какие-либо материальные затраты и значительно снижающие временные затраты. Точность воспроизведения моделью поведения реального объекта зависит от требований, предъявляемых к ней, и задается на этапе моделирования. Математическая модель может быть феноменологической, т.е. опираться на результаты эмпирических исследований. Моделирование промышленных технологий и систем выполняют в виде модели их элементов и модели взаимоотношений элементов [216].

Математическая модель элемента, как правило, представлена функциональной моделью, т.е. непрерывной моделью среды. Для их составления используют математический аппарат алгебраического или дифференциального исчисления. Такие модели позволяют описать ряд процессов, протекающих в объекте моделирования. Как правило, это тепловые, механические, физико-химические и другие процессы. Математическая модель в этом случае является непрерывной и демонстрирует непрерывность реального процесса во времени.

Взаимосвязь элементов (пространственная, геометрическая и пр.) отражается структурными моделями [79,90,104,127,223].

Математическая модель может дополняться и совершенствоваться на основе новой информации об объекте моделирования. Также получение новой информации может привести к изменению структуры модели в целом. Тогда предыдущий вариант модели считают асимптотическим.

В теории и практике научных исследований существуют основные подходы к моделированию систем и процессов. Основная особенность подходов – необходимость правильного корректного отбора существенных параметров и взаимосвязей при формировании модели, которые используются на этапе ее идентификации [243].

Составление математической модели осуществляется с применением понятийного аппарата и терминологии, распространенной в изучаемой предметной области. Основное назначение математической модели – прогнозирование процессов, протекающих в исследуемой системе. Именно с учетом этого назначения следует проводить отбор параметров и взаимосвязей в модель.

Рассмотрим принципы отбора применительно к существующей иерархической классификации сложных систем. Принято выделять неживые, биологические и социальные системы. Принципы отбора в них различны. Например, неживые системы в качестве принципов отбора используют законы сохранения вещества, импульса, энергии и др. [242]. Моделирование таких систем начинается с отбора основных характеристик объекта моделирования и записи с их помощью законов сохранения. Для сужения допустимых направлений движения системы используют принципы устойчивости систем, принцип минимума диссипации энергии, законы термодинамики и другие ограничительные условия, как правило, физические, зависящие от особенностей решаемой задачи. В процессе моделирования возникают новые принципы отбора переменных и взаимосвязей.

Применительно к биологическим системам также используют законы сохранения и принцип обратных связей, необходимых для управления и передачи информации.

Сложная система должна быть управляема в процессе функционирования. Как правило, под управлением понимают процесс приближения параметров системы к их заданным, заранее выбранным значениям. Изучение функционирования систем производят в стационарных установившихся условиях. По мнению Н. Винера исследуемую систему необходимо саморегулировать [14,200]. Н. Винеру принадлежит разработка теории управления по информации, имеющейся в системе. Принцип управления заключается в использовании обратных связей. В качестве управляющего воздействия выбирается параметр, который несет в себе наибольшее количество информации. На процесс управления могут быть наложены ограничения – физические или критериальные. Физические ограничения зависят от человеческого ресурса, их практически невозможно модифицировать. Критериальные изменить можно.

Известна классификация математических моделей:

1. Математические модели, в которых управление отсутствует. Они, как правило, применимы при описании поведения реальных систем. Примерами являются прогностические модели с заданными исходными условиями. Такие модели могут содержать стохастический компонент. Для математического описания используются дифференциальные уравнения первого порядка:

$$x = f(x, t, \xi) \quad (1.6)$$

где ξ - случайный вектор с неизвестным законом распределения.

Математическое описание в данном случае включает статистику.

2. Оптимизационные математические модели могут быть описаны выражением:

$$x = f(x, t, u) \quad (1.7)$$

где u – управление, выбор которого осуществляется субъектом из условия достижения поставленной цели.

3. Математические модели, используемые при анализе конфликтных ситуаций. Примем, что поведение объекта моделирования зависит от нескольких субъектов, характеризуемых несколькими управляющими воздействиями u, v, w, \dots . В этом случае математическая модель описывается выражением:

$$x = f(x, t, u, w) \quad (1.8)$$

Такие модели способны описать целый класс кибернетических управляемых систем. С такими системами, как правило, ассоциируется группа субъектов [200].

Математическое моделирование технологических процессов базируется на использовании аппаратов дифференциального и интегрального исчисления. При этом используются основные физические законы [118, 204, 205, 216]:

1 – законы сохранения субстанции (закон сохранения массы M , закон сохранения энергии \mathcal{E} и закон сохранения импульса D). Они предполагают превращения энергии, массы или импульса при постоянстве их алгебраической суммы.

2 – законы термодинамического равновесия - законы, определяющие термодинамический баланс системы, в частности, отсутствие переноса вещества.

3 – законы переноса субстанции - законы, с помощью которых может быть описан ход технологического процесса во времени.

4 – законы сохранения энергии, массы или импульса (\mathcal{E} , M , D), которые позволяют записать уравнения балансов системы: энергетического, материального и теплового.

5 - законы равновесия. Технологический процесс производства КГПК заключается в модификации макроскопических свойств компонентов, т.е. изменении их состава и агрегатного состояния. Управление процессом заключается в поддержании температуры и давления. Управляющими воздействиями могут быть подача или отвод тепла, расхода вещества, воздействие со стороны внешних силовых полей, вызывающих перемещение энергии, массы, импульса. В технологической системе возможно подвижное равновесие, которое наступает при отсутствии изменения макроскопических свойств компонентов. Состояние технологической системы в таком случае зависит от внутренних условий. Градиенты температуры T , давления P , химического потенциала m , плотности ρ при подвижном равновесии системы и соответствующие им материальные потоки равны нулю:

$$dF = 0; dP = 0; dm = 0; dp = 0 \quad (1.9)$$

Самопроизвольные процессы в системе направлены на достижение равновесия. Чем больше текущее состояние системы отклоняется от равновесного, тем интенсивнее протекают процессы переноса вещества и выше скорость технологического процесса.

б – законы переноса вещества. Потенциал переноса вещества может быть отражен количеством движения, энергией или удельной массой. Мощность источников потенциала переноса вещества может быть записана через объемную удельную плотность.

1.6.3 Современное состояние моделирования технологий и системно-информационный подход при разработке новых и совершенствовании существующих технологий в условиях информационной неопределённости

Моделирование технологических систем и процессов, как правило, проходит в условиях информационной неопределенности. Рассмотрим причины ее возникновения:

- большой разброс и нечеткость представления характеристик пищевых систем и объектов [10,79,88,139];
- неоднородность структуры сырья и исходных материалов;
- неполное представление о влиянии показателей качества сырья и исходных материалов на показатели качества конечного продукта;
- отсутствие стабильности показателей качества сырья и исходных материалов;
- масштабность технологических и производственных задач;
- динамика производственных условий;
- отсутствие четкой формулировки различных аспектов цели, например, социальных, технологических, экономических и пр.;
- отсутствие четкой формулировки критериев управления и принятия решений;
- колебания спроса и предложения на готовый продукт.

Наиболее полный сравнительный анализ существующих методов моделирования технологической системы производства смесей с указанием их положительных и отрицательных сторон представлен в работе [200]. В работе [122] акцент сделан на использовании принципов и методологии системного подхода как неотъемлемой части процесса проектирования, моделирования и создания новых технологий производства пищевых смесей.

Моделирование детерминированных и стохастических технологических операций описано в работах отечественных (Ю. А. Ивашкин, В. Д. Косой, Н. Н. Мизерецкий, В. В. Митин, Н. С. Николаев) и зарубежных (R. Barker, G. Kormendy) исследователей [200].

Несмотря на масштабность исследований вопроса, остается нераскрытым аспект моделирования технологии производства в реальных условиях информационной неопределенности. Вопросы нечеткого моделирования в условиях недостатка информации раскрыты учеными-исследователями С. П. Гольденбергом, А. Е. Красновым, О. Н. Красулей, Н. Н. Липатовым, В. В. Митиным, В. А. Панфиловым, И. И. Протопоповым, И. А. Роговым, А. В. Серебряковым, В. А. Трефиловым, В. И. Тужилкиным, а также зарубежным исследователем Q. Zhang [139, 200, 251, 253, 254, 265].

Вопросам прогнозирования производственных технологий посвящены работы Р. Е. Беллмана, А. Г. Бутковского, В. И. Комарова, О. А. Масленниковой, Н. Ф. Небурчиловой, А. А. Фельдбаума и др. [191, 200]. В них отмечено, что прогнозирование возможно только для разработки описания технологии и не может быть использовано при моделировании динамики прогнозов.

Как установлено, разработка технологии производства сложной многокомпонентной смеси осуществляется только с применением положений системного анализа на основе моделирования и прогнозирования. Исследование должно проводиться с позиций центрирования системно-информационного обеспечения разрабатываемой технологии, что позволит анализировать не только текущее состояние, но и выполнить прогноз состояний, в том числе управляющих воздействий.

В настоящее время известны только результаты применения системной методологии к отдельным технологическим операциям или их группам. Это отражено в работах О. В. Большакова, В. Г. Борескова, Г. Б. Гаврилова, В. И. Ивашова, А. Б. Лисицына, Б. А. Лобасенко, Ю. В. Татулова, А. Г. Семенова и др. [191, 193].

Работы Ю. А. Ивашкина, В. В. Кафарова, Н. Н. Мизерецкого, В. В. Митина, В. А. Панфилова, А. М. Попова, М. П. Щетинина и др. [191-193] посвящены вопросам системного исследования технологий и технологических процессов с учетом их иерархичности, надежности, устойчивости и целостности.

Также выполнены исследования по интеграции ряда показателей многокомпонентной системы – электрофизических, оптических, акустических и др. Результаты исследований В. Я. Адаменко, С. В. Некрутманом, И. А. Роговым и представлены в работах [200].

На основании анализа подходов к моделированию можно заключить, что развитие приложения системной методологии к проектированию пищевых процессов в условиях информационной неопределенности является особо актуальной задачей.

1.6.4 Реализация модульного принципа в производстве гранулированных продуктов на основе молочной сыворотки с позиций системного подхода

Момент формирования современного агропромышленного комплекса (АПК) относится к XX веку. Именно в это период АПК сложился как многообразная и сложная система со своими законами функционирования и развития. Как показывает история, пищевая промышленность развивалась стихийно, что вызвало неконтролируемые расходы ресурсов (материальных, энергетических, трудовых).

С этих позиций проблема совершенствования АПК, в целом, и пищевой отрасли, в частности, требует незамедлительного решения. В настоящее время не существует единого решения в рамках отрасли, имеются лишь разрозненные

частные решения отдельных подпроблем, которые необходимо интегрировать с участием методологии системного подхода. На данный момент предприняты попытки решения следующих задач – повышение пищевой ценности и качества продуктов, внедрение ресурсосберегающих технологий, повышение производительности труда и пр.

Решение частных проблем не обеспечивает совершенствование АПК в целом. Поэтому основой научно-технической политики на современном этапе его развития становится системный подход. В некоторых случаях есть необходимость использования синергетического подхода. При этом решение обозначенной проблемы должно соответствовать требованиям не только данного предприятия пищевой отрасли, но и их комплекса, а также общества в целом . [213-218].

Научно-техническая политика, направленная на совершенствование АПК, должна проводиться централизованно. Однако проведение политики не может быть строго административным. Оно должно исходить из результатов научных исследований закономерностей функционирования и развития АПК.

К недостаткам современного АПК можно отнести следующее:

- 1 – дублирование технологических процессов и оборудования;
- 2 – избыточность технологических процессов и оборудования;
- 3 – утрата знаний о технологических процессах;
- 4 – частичное использование технологического оборудования;
- 5 – моральный износ технологического оборудования раньше сроков физического износа.

Рассмотрим аспект дублирования разработок технологических процессов и оборудования. Конечный пищевой продукт включает, как правило, 50–70% компонентов общего назначения. К ним могут быть отнесены ароматизаторы, загустители, разрыхлители, красители и т.д. Аппаратурное оформление большинства технологических процессов также однотипно. Среди типового технологического оборудования, по мнению академика В. А. Панфилова, встречаются выпарные и сушильные аппараты, смесительное и дозирующее оборудование, аппараты для экструзии и гранулирования, прессы и др. Таким

образом, технологическое оборудование многих предприятий пищевой отрасли схоже, более чем на 50%. Однотипными являются и работы по их монтажу, наладке, настройке и перенастройке под технологические потоки.

Избыточность технологических процессов и оборудования заключается в следующем. Нередко на предприятиях одной и той же пищевой отрасли, а иногда и в условиях одного и того же производства, но в разных цехах, для проведения однотипных технологических процессов разрабатывается новое технологическое оборудование. Это объясняется тем, что в оснащении технологических процессов принимают участие специалисты с разным уровнем квалификации и знания технологического процесса и его технического обеспечения. Количество единиц такого оборудования и, соответственно, технологических процессов может достигать до десятков и сотен в пределах одной отрасли. Сравнительная оценка их экономической эффективности говорит о том, что они практически идентичны. Среди разработанной технической оснастки технологического процесса, конечно, иногда присутствуют уникальные разработки, но их количество практически незаметно на общем фоне.

Поэтому дублирование и избыточность технологических процессов и оборудования является актуальной проблемой, снижающей эффективность АПК.

С целью устранения данной проблемы необходимо перестройка пищевой отрасли АПК на основе внедрения методологии системного и синергетического подходов в процессы проектирования инновационных технологий производства. Решение обозначенной проблемы АПК возможно, в первую очередь, посредством внедрения организационной структуры на основе модульного принципа построения производственной цепочки: пищевой продукт – технологический процесс – технологическая система – рабочее место [229].

Построение системы на основе модульного принципа может быть заимствовано, например, из строительной отрасли, машиностроения и других высокоорганизованных отраслей народного хозяйства. Применение модульного принципа в АПК на современном этапе его развития носит фрагментарный характер, не имеет системной организации.

Как показывает практический опыт, созданы все необходимые предпосылки для внедрения модульного принципа в АПК. Назрела необходимость трансформации существующих разработок технологических процессов и их интеграции в качестве модулей в единое целое с применением методологии системного анализа. Такой подход, несомненно, обеспечит высокую эффективность в рамках пищевой отрасли АПК.

Для наиболее эффективного применения модульного принципа необходимо:

- разработать методы замены объекта АПК совокупностью модулей;
- определить принципы компоновки технологических процессов и оборудования из полученной совокупности модулей;
- сформировать терминологию;
- предложить методы унификации модулей;
- разработать методы оценки эффективности комбинаций модулей.

Модульность построения пищевого производства следует начать с определения модульности конечного продукта. Совокупность модулей формируется на основе типовых элементов, присутствующих в составе большинства пищевых продуктов. Это позволит достичь универсальности и простоты применения модульного подхода, и, следовательно, повысить эффективность АПК в целом и исследуемого пищевого производства, в частности.

Модуль следует определять с позиций однозначности и минимальности номенклатуры характеристик, их устойчивости во времени.

Однозначность характеристик модуля позволит описать любой конечный пищевой продукт, независимо от его назначения. Ограниченность номенклатуры характеристик приводит к типизации и унификации модулей, что повышает удобство и простоту разработки целостной системы на их основе. Длительность использования разработанных модулей обеспечивается устойчивостью их характеристик во времени.

Созданная на основе принципа модульности система может быть отнесена к классу открытых систем. В ней преобладают неустойчивость и неравновесность,

и, наоборот, равновесие и стабильность практически отсутствуют [220]. Неравновесность приводит к избирательности реакции системы на внешние воздействия со стороны окружающей среды. Система адаптируется к ним. На адаптацию системы к окружающей среде в большей степени влияют воздействия, вектор которых не совпадает с общим вектором ее развития [220].

Можно сказать, что на сложную технологическую систему не действует принцип суперпозиции внешних воздействий, т.е. система является нелинейной. Ее развитие описывается нелинейными законами, что приводит к множеству возможных альтернатив перехода в устойчивое состояние.

Для нелинейных систем свойственен пороговый характер протекающих в них процессов, скачкообразный переход из одного состояния в другое, дискретность поведения. Такие процессы сопровождают качественное изменение характеристик системы [216,242].

Неравновесные открытые нелинейные системы образуют с внешней средой положительные обратные связи, которые являются источником дополнительной неравновесности, приводят к колебаниям характеристик и параметров системы [242]. Последствия такого взаимодействия системы с окружающей средой зачастую непредсказуемы.

Модули технологической системы должны соответствовать предъявляемым требованиям качества и безопасности исходного сырья, готовой продукции, технологического оборудования. Также предъявляются требования к информационной и иным видам совместимости с целью применимости блочно-модульного принципа построения.

Каждый уровень системы характеризуется набором функциональных, конструктивных и потребительских параметров. Поэтому при построении технологической системы на основе методологии системного подхода необходимо создание информационного поля характеристик и параметров. Сложность решения такой проблемы заключается в необходимости создания и анализа алгоритмов синтеза и идентификации систем, применения современных методов математического и компьютерного моделирования [200].

На первый план выходит понятие синергетической структуры [191]. Структура открытой системы отражает взаимосвязь ее элементов и характеризует ее внутреннюю организацию. Основными параметрами структуры является устойчивость, четкость структурных связей, способность сопротивляться внешним воздействиям. Именно структурирование открытой системы позволяет ей находиться в состоянии равновесного обмена энергией и веществом с окружающей средой.

Структура системы есть следствие эволюции, которая проходит под воздействием двух факторов – случайности и необходимости. На начальном этапе преобладающее значение имеют стохастические процессы. После формирования структуры система функционирует по детерминированным законам.

1.7 Особенности технологий и процессов многокомпонентных гранулированных пищевых концентратов с сухой молочной сывороткой и их классификация

Целью инстантирования является повышение степени увлажняемости и растворимости в воде сухого продукта.

Известен ряд исследований Н. Н. Липатова, В. Д. Харитоновой, В. Ф. Добровольского, В. А. Ломачинского, Л. А. Маюрниковой, А. М. Попова, Й. Дернея [5,73,75,133,134,231,349]. Установлено, что практически любой порошковый пищевой продукт можно сделать быстрорастворимым, изменив ряд его физических свойств. В качестве примеров таких пищевых продуктов могут быть приведены: порошковое молоко, полученное методом распылительной сушки [73,75]; порошкообразную сухую сыворотку [237]; сахар; фруктовые и овощные порошки [244]; «какао-молоко» [75].

В рецептуре порошковых пищевых продуктов часто присутствуют сыпучие компоненты, нерастворимые в воде. Они также могут быть переведены в разряд быстрорастворимых, например, агломерированием [21,120,141,142,242,288,302]. Примерами таких продуктов являются мука и мучные смеси для выпечки блинов.

Быстрорастворимая мучная смесь, благодаря низкой степени гетерогенного распределения компонентов, позволяет получить готовый продукт в большом объеме и с лучшими параметрами качества.

Рассмотрим основные свойства быстрорастворимых пищевых продуктов:

- способность увлажняться (или увлажняемость), иными словами, способность продукта поглощать влагу;
- погружаемость – способность увлажненного порошкообразного продукта к погружению в растворитель;
- диспергируемость – способность порошкообразного продукта распадаться на отдельные частицы в растворителе;
- растворимость – способность порошкообразного продукта растворяться в растворителе, как правило, в воде.

Обратимся к понятию «инстант». Поскольку речь идет о быстрорастворимых в воде порошковых пищевых продуктах, данный термин используется в значении «немедленно, мгновенно». Но если изучить процесс взаимодействия увлажненного быстрорастворимого пищевого порошка пристально, то мы заметим, что частицы (гранулы) практически мгновенно распадаются на более мелкие частицы и равномерно распределяются в объеме растворителя. Наблюдателю кажется, что продукт растворился в воде. Но, чаще всего, о растворении речь вообще не идет. Такие процессы происходят за счет гидратации поверхности твердых частиц порошкового продукта [23,25,242]. Также можно сказать, что на начальном этапе взаимодействия частиц порошка с растворителем происходит набухание. Сущность набухания состоит в проникновении молекул воды внутрь твердой частицы и разрушении связей ее структуры. В процессе такого проникновения разрушаются связи в неорганических и органических соединениях. Наиболее наглядно процесс набухания происходит при взаимодействии частиц крахмала с водой.

Термин «инстант» говорит о том, что твердое тело (частица порошка) может достаточно быстро и равномерно увлажниться. Имеется в виду высокая скорость

взаимодействия частиц с молекулами растворителя (воды): или растворение, или распределение в объеме растворителя с образованием суспензии.

Однако не известен способ комплексной характеристики свойств порошковых быстрорастворимых пищевых продуктов. Для разных продуктов растворимость оценивается разными методами. Анализ результатов исследований по данному вопросу [5,73,75,133,134,231,349] позволяет говорить о том, что их физико-химические свойства могут быть охарактеризованы значениями скорости увлажнения и скорости растворения.

Рассмотрим основные группы способов производства инстант-продуктов в зависимости от свойств сырья и исходных компонентов и влияния факторов производственной среды.

Первая группа способов предполагает изменение физико-химических свойств исходного, концентрированного или высушенного сырья, а также использование различных пищевых добавок. Изучен ряд способов приготовления быстрорастворимых порошковых пищевых продуктов [75,229,240,287] и установлено, что большинство из них состоит из следующих технологических операций: фракционирование, укладка, кондиционирование, тепловая обработка крахмалсодержащих продуктов, обезжиривание удаление воздуха с поверхности зерен, кристаллизация и др.

Добавление различных пищевых порошков позволяет повысить увлажняемость и увеличить его способность к диспергированию. В качестве добавок можно рассматривать:

– наполнители с высокой степенью увлажняемости (лактоза, декстрины, сахароза, декстроза и амилоза и т.д.) [259], которые хорошо поглощают воду на начальном этапе увлажнения и затем передают ее твердым веществам с низкой степенью увлажняемости («прессо» декстроза жирного продукта в составе молочного порошка [75], пищевая соль [240]);

– поверхностно-активные вещества (ПАВ) (эмульгаторы).

Если рассматривать в качестве примера смесь сахара с ягодной мукой, то использование эмульгатора в данном случае позволит создать химические и (или)

физические связи между кристаллами сахара и мукой из ягодного шрота [121]. При этом лиофильная часть эмульгатора характеризуется аффинностью к какао-порошку, а гидрофильная его часть обладает аффинностью к кристаллическому сахару. Поэтому поверхность частиц порошка ягодного шрота очень хорошо увлажняется молоком или водой. Аффинность практически не преодолима механическими способами. Полученный продукт сохраняет высокую способность к растворению даже в холодных растворителях, в том числе после длительного хранения или воздействия посторонней вибрации. Лучшие эмульгаторы – моноглицериды ненасыщенных жирных кислот, диглицериды и лецитин [240]. К частоиспользуемым ПАВ можно отнести: метилглюкозид (монококонад, дикоконад, моноолеат), пропилен (глицольмономиристан, глицольмонолаурат, глицольмонопальмитат, глицольмоностеарат), сорбит (моностеарат, монолаурат, монопальмитат, моноолеат), глицерин (моностеарат, моноолеат, мономиристан, монолаурат), их смеси [75,240,287].

В составе быстрорастворимых порошковых пищевых продуктах часто применимы стабилизаторы с целью снижения осадочности твердых веществ в растворителе. Наиболее популярными стабилизаторами являются альгинат натрия, метилцеллюлоза, крахмалы, желатин карбоксиметилцеллюлоза, декстрины, некоторые виды растительного клея.

Вторая группа – получение изолированных зерен в составе частиц быстрорастворимого порошкообразного пищевого продукта, характеризующихся оптимальным строением и размерами. Речь идет о содержании необходимого количества воздуха, заданной плотности или структуре оболочки зерна [242]. Данная задача решается в случае производства высушенных продуктов, которые также можно отнести к классу быстрорастворимых. Такие продукты могут быть получены в результате распылительной сушки. Как правило, частицы готового продукта имеют толстые стенки, образующие полости, заполненные воздухом [229]. Следует заметить, что частицы готового продукта имеют правильную шарообразную форму и характеризуются высокими значениями удельного веса и удельной плотности. В стенках частицы материала в процессе сушки

формируются каналы, которые легко заполняются растворителем. Таким образом, растворитель проникает во внутреннюю полость частицы, а воздух по тем же каналам в ее стенках выходит наружу. Происходит процесс одновременного растворения частицы снаружи и изнутри. Так достигается высокая скорость растворения пищевого продукта.

Количество воздуха, находящегося во внутренней полости шарообразной частицы материала, определяет ее плотность и, в свою очередь, зависит от технологии производства. Влияние на количество воздуха и формирование структуры частиц оказывают способы измельчения продукта, приготовления смеси, распыления исходной среды в пространстве сушильного аппарата, тип сушки. В процессе распыления исходной среды через форсунки аппарата частицы воздуха распределяются в небольшом объеме жидкости (капле) и остаются там до полного ее высушивания. В процессе сушки на поверхности капли образуется слой пористого твердого вещества, который пропускает воздух из внутренней полости частицы материала. Воздух выходит в составе паровоздушной смеси, образованной испарением жидкости (растворителя) за счет протекания тепломассообменных процессов. Если говорить о быстрорастворимых порошковых продуктах на основе молочного сырья [73, 270], то их можно получить путем аэрации концентрированного сырья с содержанием сухих веществ в интервале (60–65)% сжатым азотом или воздухом [310]. Таким способом могут быть приготовлены молочный и сывороточный порошки, шоколадное молоко и т.д.

Третья группа – модификация структуры и размеров частиц порошка, используемого в рецептуре быстрорастворимых пищевых продуктов. Основной способ – агломерация частиц с целью получения гранул, оптимальных по размерам и внутренней пористости [240]. Такие гранулы интенсивнее поглощают влагу при растворении, поскольку готовый продукт не содержит мелких фракций, образующих при взаимодействии с растворителем пленку на поверхности гранулы, задерживающую молекулы растворителя у поверхности и препятствующую их проникновению внутрь гранулы. Полученные таким

способом гранулы хорошо диспергируют в объем растворителя под воздействием внутренних сил капиллярного давления.

Основной способ приготовления быстрорастворимых продуктов основан на агломерации – направленном изменении структуры и размеров частиц полидисперсных порошкообразных материалов [75,263,240]. При детальном рассмотрении механизма агломерации можно установить, что данный процесс заключается в присоединении мелких частиц продукта друг к другу с образованием сгустка или зерна. Для структуры полидисперсного пищевого продукта в данном случае характерна большая рыхлость, открытость и присутствие комков (или зерен) большего размера, чем в исходном продукте [240].

Под гранулированием будем понимать модификацию исходной сухой сыпучей массы либо увлажненной полидисперсной массы, как правило, бесформенно агрегированной, в гранулы, частицы которого (гранулы) имеют примерно одинаковую прочность, плотность, размеры и форму.

Гранулирование повышает способность продукта впитывать влагу и улучшает рассыпчатость при взаимодействии с растворителем.

Влажные агломераты, полученные в результате структурирования исходного продукта под воздействием механических, гидромеханических и других сил, далее подвергаются сушке.

В практике гранулирования известны следующие способы структурирования – одноступенчатые, предполагающие дегидратацию в рамках одного процесса, (рисунок 1.4) и двухступенчатые (или с увлажнением), предусматривающие дегидратацию в результате повторного увлажнения (рисунок 1.5).

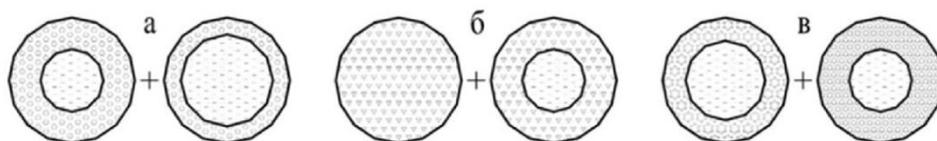


Рисунок 1.4 – Схватывание микрочастиц при одноступенчатом процессе агломерирования

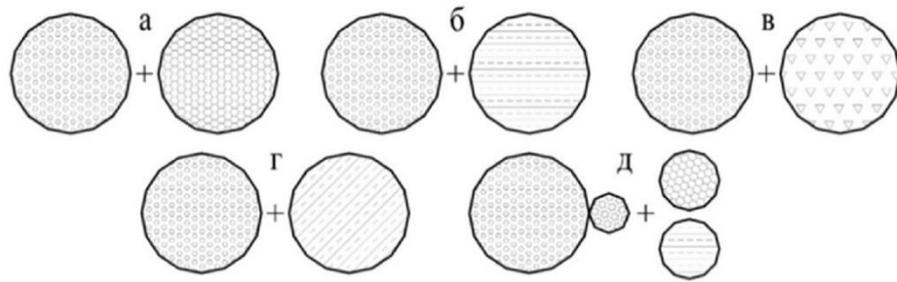


Рисунок 1.5 –Связывание микрочастиц при двухступенчатом процессе агломерирования

Также способы структурирования могут быть классифицированы в зависимости от вида взаимосвязи частиц продукта и характера движения агломерируемых частиц.

При одноступенчатом способе наблюдается агломерация зерен на заключительном этапе дегидратации. Двухступенчатый способ предполагает наличие следующих технологических операций: повторное увлажнение порошка продукта, агломерация его частиц после увлажнения, повторная сушка. При одноступенчатом способе повторная сушка увлажненного порошка отсутствует, но, тем не менее, именно такой способ является непригодным при выработке инстантированных порошковых пищевых материалов и смесей.

Увлажняющие и агломерирующие исходную смесь материалы выбираются в зависимости от способа их применения [22, 115, 116, 137, 138, 159, 181, 183, 232, 238, 300, 312, 318]. Рассмотрим некоторые из них:

– жидкая среда, за счет взаимодействия с которой поверхность частиц вещества становится липкой и клейкой, что вызывает слипание частиц в комки. Часть исходного пищевого порошка растворяет либо меняет свою структуру каким-либо способом, за счет чего обеспечиваются необходимые условия процесса. Самой распространенной жидкой средой для увлажнения компонентов пищевой смеси является вода. Она очень хорошо увлажняет сахар, муку, молочный порошок. Вода практически в любых соотношениях хорошо смешивается с алкоголем и другими органическими растворителями, которые можно использовать в качестве увлажнителей и агломерирующих веществ порошковых продуктов;

- растворы и суспензии, которые хорошо связывают частицы порошкового материала и приводят к их агломерированию, например, крахмалосодержащие продукты в виде растворах, концентрированная молочная сыворотка;

- вещества, переходящие при нагревании в жидкое агрегатное состояние, например, жиры животного происхождения, которые могут использоваться для агломерирования сухих кондитерских смесей;

- различные смеси и вещества пищевого назначения, разрешенные к использованию в качестве агломерирующей добавки к порошкообразным смесям. Они могут использоваться либо только в качестве агломерирующих веществ, либо могут соединяться и встраиваться в агломераты.

Каждый из существующих способов структурирования полидисперсных пищевых порошковых продуктов имеет достаточно простую техническую реализацию. Выбор способа обусловлен специфическими особенностями требований, предъявляемых к свойствам конечного продукта. При изготовлении быстрорастворимых гранулированных пищевых продуктов структурирование можно рассматривать как самостоятельный процесс или в совокупности с внесением различных добавок с целью модификации физико-химических свойств вырабатываемого продукта.

Результаты анализа и систематизации приведенных выше источников в совокупности с работами [143, 144, 157, 166, 181, 182, 185, 187, 332] позволяют классифицировать методы получения полидисперсных быстрорастворимых пищевых инстант-продуктов по характерным технологическим признакам.

1.8 Классификация полидисперсных многокомпонентных сред и уровни рассмотрения их как объектов

Анализ данных, представленных в современной научной литературе, свидетельствует об отсутствии единой классификации полидисперсных сред. Это обусловлено многообразием их свойств (физических, химических и пр.).

размеров, конфигураций, значениями концентраций дисперсной фазы в дисперсионной среде и многими другими факторами.

Химическая наука в качестве отличительных признаков дисперсных систем выделяет [1, 2, 4, 91, 248]: размер частиц дисперсной фазы; вид дисперсной фазы; агрегатное состояние; подвижность дисперсной фазы; виды межфазового взаимодействия.

Пищевая отрасль классифицирует дисперсные системы по следующим признакам: степени дисперсности, агрегатному состоянию, типу взаимодействия дисперсных фаз [91,248]. Физико-химическая механика рассматривает отношение пищевых продуктов к той или иной дисперсной системе по структурно-механическим характеристикам [248,345,357,374], среди которых можно выделить:

1 – агрегатные состояния дисперсионной среды и дисперсной фазы [137] (таблица 1.6).

Также известна упрощенная классификация по агрегатному состоянию дисперсионной среды, включающая три группы дисперсных систем на основе газообразной, жидкой и твердой дисперсионных сред [240].

Анализ классификаций пищевых продуктов показал, что для них характерны три основные группы: твердая дисперсная фаза – газовая дисперсионная среда; твердая дисперсная фаза – жидкая дисперсионная среда; твердая дисперсная фаза – жидкая и газовая дисперсионные среды [229]. Наличие твердой дисперсной фазы характерно, например, для пищевых продуктов, вырабатываемых мукомольной, кондитерской и другими отраслями;

Таблица 1.6 – Классификация дисперсных систем по агрегатному состоянию

Дисперсионная среда	Дисперсная фаза	Условные обозначения	Тип системы и примеры
Газообразная	Твёрдая	Т/Г	Аэрозоли (копильный дым, пыль), порошки (сухое молоко и молочные продукты, пищевой и технический альбумин, меланж)
	Жидкая	Ж/Г	Аэрозоли–туманы (дисперсия крови, молока и др. в распылительной сушилке)
	Газообразная	Г/Г	Системы с флуктуациями плотности (атмосфера Земли)
Жидкая	Твёрдая	Т/Ж	Золи, суспензии (бульон, расплавленный жир с белковыми частицами, колбасный фарш, сырковая масса, пасты, паштеты)
	Жидкая	Ж/Ж	Эмульсия (молоко, жир в воде, сливки, простокваша, кровь, яичный желток, сливочное масло)
	Газообразная	Г/Ж	Газовые эмульсии, пены (крем, взбитые сливки, взбитый белок, газовые эмульсии в технологических процессах теплообмена, пены в производстве мороженого)
Твёрдая	Твёрдая	Т/Т	Твёрдая суспензия, сплав (замороженная мышечная ткань)
	Жидкая	Ж/Т	Капиллярные системы, твёрдая эмульсия (замороженное сливочное масло, жидкость в пористых телах, адсорбенты в растворах)
	Газообразная	Г/Т	Пористые тела, твёрдые пены (сыр, взбитый и коагулированный меланж, кость, пенопласт, изоляционные материалы)

2 – размер частиц дисперсной фазы (таблица 1.7).

Таблица 1.7 – Классификация дисперсных систем в зависимости от размера частиц дисперсной фазы

Класс	Размеры частиц, м	Дисперсность, м ⁻¹
Высокодисперсные	$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^7 - 10^9$
Среднедисперсные	$10^{-7} - 10^{-5}$	$10^5 - 10^7$
Грубодисперсные	$>10^{-5}$	$<10^5$

Существует разделение дисперсных систем на микрогетерогенные (среднедисперсные) и ультрамикрогетерогенные (высокодисперсные) [92,93];

3 – вид дисперсной фазы (таблица 1.8) [239];

Таблица 1.8 – Характеристика дисперсных систем по виду дисперсной фазы

Дисперсная фаза		Представители
Вид	Характеристика	
Трёхмерная	Твёрдые частицы, капли, пузырьки	Мука, молоко, майонез, растворимый кофе, почва, порошок цемента и бетона
Двухмерная	Нити, волокна, капилляры, поры	Хлеб, сухари, древесина, ткани, пористые вещества, фаршевые мясопродукты, волосы, кожа
Одномерная	Плётки, мембраны	Жидкие плётки, тонкие плётки (мембраны)

4 – подвижность дисперсной фазы. Различают свободнодисперсные и связнодисперсные системы. В свободнодисперсных системах дисперсная фаза свободно перемещается в объеме дисперсионной среды под действием внешних или внутренних факторов. В таких дисперсионных системах отсутствует контакт между частицами дисперсной фазы. Примерами свободнодисперсных систем являются золь, суспензия и эмульсия. Связнодисперсные системы – это системы, в которых какая-либо фаза жестко закреплена в ее структуре и не может свободно перемещаться в объеме дисперсионной среды. Примерами связнодисперсных систем являются паста, пена, гель, студень, концентрированная эмульсия, капиллярно-пористое тело [137]. Связнодисперсные системы в отличие от свободно-дисперсных обладают такими механическими свойствами, как прочность, упругость, вязкость, пластичность;

5 – тип и характер контактов. Данный признак предлагает разделение дисперсных систем на коагуляционные и конденсационно-кристаллизационные (таблица 1.9) [231].

Таблица 1.9 – Типы и характеры контактов между частицами

Контакты	/с, Н	кДж	Примечание
Коагуляционные непосредственные (точечные)	$10^{-9} - 10^{-8}$	$10^{-17} - 10^{-16}$	Контакты возникают в высокодисперсных порошках
Коагуляционные через тонкую прослойку жидкости	$10^{-10} - 10^{-8}$	$10^{-19} - 10^{-18}$	Контакты возникают в пастах (суспензиях) или эмульсиях
Конденсационно–кристаллизационные	$>10^{-7} - 10^{-6}$	$>10^{-17} - 10^{-16}$	Прочные контакты, характерные для конденсационных структур дисперсных материалов

6 – структурно-механические характеристики. Данный признак определяет по величине механических свойств (например, модуль упругости) некоторую шкалу от твердого до истинно-вязкого состояния. В работе [374] выделены три основные группы: 1 – твердые и твердообразные пищевые продукты; 2 – твердо-жидкие пищевые продукты; 3 – жидкообразные пищевые продукты и пищевые жидкости.

Также широкое распространение получила классификация продуктов пищевого назначения по сдвиговым характеристикам. В таблице 1.10 представлена классификация мясных и молочных продуктов по упруго-вязкопластичным свойствам по модулю Юнга, вязкости и их соотношения [37].

Сдвиговые свойства пищевых продуктов наглядно описывают их свойства с позиций дисперсных систем, поэтому могут быть успешно использованы для оценки их качества;

7 – размеры пор частиц дисперсной фазы. Данный признак позволяет выделить [24]:

- микропористые дисперсионные системы, состоящие из пористых частиц, размер пор которых доходит до $2 \cdot 10^{-7}$ см;
- переходно-пористые дисперсионные системы, состоящие из пористых частиц, размер пор которых варьируется от $2 \cdot 10^{-7}$ см до $2 \cdot 10^{-5}$ см;
- переходно-пористые дисперсионные системы, состоящие из пористых частиц, размер пор которых превышает $2 \cdot 10^{-5}$ см.

Таблица 1.10 – Классификация дисперсных систем по структурно–механическим свойствам

Тип структурированных систем	E , Па	η , Пас	η/E , с	Тип дисперсных систем	Представители
Свободно–дисперсные	<10	<10	<10	Т/Ж (золи, суспензии)	Естественные водоёмы; некоторые полупродукты текстильной, кожевенной, бумажной, металлургической и др. отраслей промышленности; майонез, соусы, соки
				Ж/Ж (эмульсии)	Нефть, смазочно–охлаждающие жидкости, пропиточные композиции, лекарственные и косметические средства, молоко
				Т/Г (аэрозоли)	Промышленная, атмосферная и космическая пыль
				Т/Г	Цемент; известь, мел; удобрения; средства пожаротушения; наполнители и структурообразователи; компоненты в производстве керамики и металлокерамики; пищевые массы (зерно, крупа, мука, комбикорм, сахар–песок)
Связно–дисперсные	$10-10^4$	10^2-10^5	$10^{-1}-10^2$	Т/Г	То же, что и предыдущее
				Т/Г, Т/Ж (гели, студни, мази, пасты)	Силикагель, набухшие ионообменные смолы, резина, каучук, многочисленные пасты и мази, лакокрасочные покрытия, обработанная кожа, бездымный порошок, пищевые массы (сливочное масло, маргарин, патока, тесто, мясной фарш, плавленый сыр, творог, сметана, халва, мармелад)
Твёрдые структуры	$>10^4$	$>10^6$	$>10^2$	Ж, Г, Т/Г (твёрдые пены)	Композиционные материалы, наполненные пластики, керамика, пенопласт, пищевые массы

8 – силы межфазного взаимодействия. Учитываются силы межмолекулярных взаимодействий, возникающих между дисперсионной средой и

дисперсной фазой в дисперсной системе. Классификация может быть использована только для систем с жидкой дисперсионной средой [137];

9 – преобладающая форма связи влаги с пищевым продуктом. В соответствии с данным признаком классификации можно выделить: коллоидные системы, в которых влага связана с продуктом физико-химическими связями; капиллярно-пористые, в которых влага связана с продуктом физико-механическими связями; коллоидные капиллярно-пористые, в которых влага связана с продуктом одновременно физико-химическими и физико-механическими связями. К последним можно отнести творожно-сырковую массу, мясной фарш и др. [231].

Конечным продуктом пищевой промышленности можно считать продукт, произведенный из сырья животного или растительного происхождения, потребительские свойства которого сформированы в результате технологической обработки. С позиций пищевой биотехнологии могут быть рассмотрены следующие уровни биотехнологических систем:

- 1 – структуры на уровне молекул;
- 2 – структуры на клеточном уровне;
- 3 – дисперсные частицы;
- 4 – элементы пищевых масс, в частности, пленки, слои кусков, объемы единовременной загрузки;
- 5 – технологические процессы и аппараты;
- 6 – технологические линии и др. [240].

С первого по пятый уровни – уровни кинетических процессов, которые имеют место в сырье биологического происхождения. Шестой уровень и выше – организационные системы биотехнологических процессов: характерными для них являются процессы управления.

В настоящее время кинетические процессы, обусловленные совокупностью молекул белковых соединений, а также процессами в биологических клетках сырья растительного и животного происхождения, практически не изучены. Их формализация представлена, в основном, феноменологическими моделями,

основанными на статистических или термодинамических принципах и отражающими макрокинетику процессов, протекающих на микроуровне [237, 142].

Большинство пищевых продуктов может быть идентифицировано как гетерогенные дисперсные системы. основополагающая роль в формировании их структуры принадлежит кинетическим процессам.

Исходя из уровня современной эмпирической базы знаний, можно сказать, что возможность оценки свойств пищевых продуктов на основе молекулярных и клеточных характеристик их компонентов невозможна. Поэтому на первом месте при изучении свойств пищевых продуктов остаются методы экспериментальных исследований и отдельные подходы к разработке математического описания.

В настоящее время известны следующие подходы к описанию структуры дисперсных систем:

– физический подход: дисперсная система рассматривается как совокупность неупорядоченных сред, находящихся в динамике, на микроскопическом уровне посредством корреляционного описания взаимного перемещения частиц жидкой среды [76–78];

– с позиций физической и коллоидной химии дисперсную систему можно рассмотреть как гетерогенную структуру в процессе ее создания и разрушения с учетом закономерностей обмена веществ и равновесных состояний, т.е. дисперсная система рассматривается на основе феноменологической кинетики и статистической равновесной и неравновесной термодинамики [76–78];

– биохимический: дисперсная система изучается с позиций поведения макромолекул высокомолекулярных белковых соединений на микро- и макроуровнях [36].

Таким образом, возникает необходимость переноса общих результатов, рассматриваемых различными научными направлениями, на описание дисперсных систем пищевого назначения, которые в отличие от газообразных, жидких и коллоидных систем являются их сложными совокупностями.

1.9 Заключение по аналитическому обзору, обоснование основных направлений исследований, цели и задачи

Современный рынок пищевой промышленности представлен многообразием плодово-ягодных соков и напитков. Однако особое место принадлежит сухим гранулированным смесям, на основе которых производятся напитки специального назначения. Производство напитков в виде сухих смесей позволяет значительно повысить сроки хранения продукта с сохранением пищевой ценности, увеличить дальность и длительность перевозок. Гранулированные напитки обладают лучшими показателями биологической ценности и могут быть использованы для улучшения рациона жителей удаленных районов, обогатить витаминами и необходимыми веществами рацион работников, работающих в экстремальных условиях. Также гранулирование и сушка позволяют расширить ассортимент выпускаемых плодово-ягодных напитков из привычного сырья. В связи с этим изучение сухих гранулированных и порошковых концентратов, используемых для приготовления напитков, представляет значительный научный и практический интерес. В качестве компонентов сухих гранулированных и порошковых концентратов напитков часто используют сухое обезжиренное молоко, сухую молочную сыворотку, плодоваяягодные и овощные соки, пюре, а также различные ароматизаторы [13,20,31,73,75,80,133,138,196,197,198,221,229,261,278,379]. В настоящее время в Российской Федерации наблюдается отсутствие эффективных технологий и технологического оборудования для производства пищевых порошковых продуктов. Наиболее технологически сложной стадией является производство сыпучих продуктов в агломерированной форме [119].

Существующие технологии производства агломерированных гранулированных сухих порошкообразных концентратов напитков из плодоваяягодного и молочного сырья, как правило, предполагают или многостадийное нанесение концентрированного сока на увлажняемый носитель,

например, сахар [196], или гранулирование с использованием экструзионного оборудования, или сушку в распылительных сушильных аппаратах.

С помощью сушки исходного материала в распылительных сушилках можно получить гранулы с размером частиц от 0,15 до 0,4 мм. При этом полученные гранулы медленно растворяются в воде или ином растворителе. Также трудно управлять процессами структурообразования гранулы. В работах [75] предложен способ многослойного нанесения, однако он негативно сказывается на равномерности восстановления напитка из сухой смеси, а также приводит к сегрегации [270]. Если использовать стабилизирующие добавки в качестве структурообразующего элемента, например, желатин или крахмал, то длительность и трудоемкость технологического процесса возрастет за счет введения операций приготовления коллоидных растворов и их сушки. Качество агломерирования при этом ухудшается, т.к. повышается адгезия продукта.

Использование экструзионного оборудования для осуществления процесса агломерирования [240] повышает прочность частиц гранулята, но растворимость при этом остается на низком уровне. Быстрорастворимые гранулы могут быть получены только при снижении давления процесса экструдирования, однако при этом снижается их прочность.

Методы инстантирования позволяют сформировать гранулы в виде полидисперсной системы. С применением методов представляется возможным создание технологических потоков, объединяющих использование увлажняющих добавок и структурирование капиллярно-пористой гранулы. В связи с этим метод инстантирования применим при производстве широкого спектра пищевых продуктов: быстрорастворимые продукты на основе растительного сырья (кисели, десерты, соки, грибные соусы, чай и пр.), увлажняющие наполнители – сахара (фруктоза, лактоза, глюкоза и др.) и полисахариды (крахмал, желатин и др.), двух- и трехкомпонентные полуфабрикаты на основе молочной сыворотки.

Свойства гранул, как показывает изучение механизма явлений, сопутствующих производству БГН, во многом определяются свойствами компонентов полидисперсных смесей, а также силой и видом взаимодействия их

частиц, геометрическими размерами и формой, физико-механическими свойствами (прочностью, удельной пористостью, распределением пор, гигроскопичностью и др.).

С целью повышения эффективности производства быстрорастворимых пищевых смесей необходимо проведение научных исследований указанных свойств гранул, которые позволят выявить их взаимосвязь и зависимость от основных параметров смеси и технологических условий производства.

Особый интерес представляет изучение механизма структурообразования в процессе гранулирования. На основании имеющихся данных можно говорить о том, что в процессе гранулирования происходит уплотнение структуры исходного сырья под действием различных сил деформации. К внешним могут быть отнесены деформации, возникающие в результате прессования вещества. К внутренним относят силы, величина которых определяется внутренней энергией системы за счет явления поверхностного натяжения на границе раздела фаз. Кроме того, воздействие на дисперсную систему оказывают гравитационные силы и капиллярно-адсорбционные силы взаимодействия частиц вещества.

В процессе образования агломерата присутствуют процессы перемешивания, закручивания и вибрационного перемещения частиц сыпучего или «рыхлого» материала. Площадь соприкосновения прямо пропорциональна частоте взаимодействия частиц. Поэтому вероятность образования зерна агломерата частиц вещества определяется, главным образом, скоростью их взаимодействия.

На основании вышесказанного можно заключить, что технология производства многокомпонентных сухих гранулированных смесей пищевого назначения включает следующие этапы технологического процесса: приготовление исходной многокомпонентной сырьевой смеси, представляющей собой дисперсную систему, формирование требуемой структуры и формы гранул, модификации их коагуляционной структуры с целью преобразования в конденсационную, затем в конденсационно-кристаллизационную с целью улучшения прочностных характеристик.

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 системы 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 теорий изучает дисперсные системы обособленно, но рассматривает зависимость их структурных свойств и характеристик от геометрии частиц, опираясь на них при построении математических моделей.

Технологический процесс, связанный с модификацией дисперсных систем, предполагает изменение их структурных свойств и характеристик, а также количественного соотношения фаз в составе системы. Количественное соотношение фаз может быть определено, например, весовым способом, который позволяет установить массовое или удельное содержание жидкой или твердой фазы. Однако весовой метод не дает представление о содержании газовой фазы. Отсюда следует, что оценка соотношения всех трех фаз должна выполняться по их объемному содержанию

Также необходимы инновационные подходы, базирующиеся на изучении структурных свойств пищевых продуктов на основе дисперсных систем на всех стадиях технологического процесса их производства. С этой целью могут быть использованы, например, фазовые характеристики. В частности, важной фазовой характеристикой является содержание твердой фаз (K_T), присутствующей практически всегда в многофазной дисперсной системе независимо от жидкой и газовой фаз. Нормированное значение содержания твердой фазы, приведенной к шкале $(0-100)\%$, дает возможность использовать его в качестве критерия

оптимизации формирования структуры пищевого продукта как дисперсной системы.

Изучение существующих технологий производства быстрорастворимых сухих порошковых смесей для приготовления пищевых продуктов с позиций структурообразования позволяет утверждать, что наиболее перспективным является метод окатывания, осуществляемый в тарельчатых грануляторах. Существуют различные методы гранулирования, однако присутствие в полидисперсной многокомпонентной пищевой смеси таких компонентов, как молочная сыворотка, сахар, лактоза и крахмал, обуславливает выбор «сухого» или «полумокрого» метода. Смесь для производства функциональных плодово-ягодных напитков, подвергаемая гранулированию, может рассматриваться как трехфазная полидисперсная система.

Основные факторы технологических процессов сушки и гранулирования – свойства фаз дисперсной системы и особенности их взаимодействия под воздействием механической и температурной обработки. Особая роль при этом отводится жидкой и твердой фазам. Следовательно, процессы гранулирования и сушки зависят, главным образом, от гидрофильности и влагоемкости материала, а также скорости капиллярного влагообмена. Именно эти свойства в совокупности влияют на комкуемость компонентов в составе дисперсной системы.

Основной отличительной чертой твердой фазы является развитость ее поверхности, поэтому она характеризуется избыточной свободной энергией. При этом агрегация – следствие стремления к снижению энергии дисперсной системы.

На повышение эффективности процесса комкования полидисперсных систем значительно влияет присутствие тонких коллоидных и полукolloидных фракций и сывороточных белков. В процессе формирования гранулы твердая фаза частично концентрируется в жидкой фазе. Таким образом происходит образование поровой суспензии из компонентов исходной дисперсной системы. Каркас гранул формируется из грубодисперсных фракций, которые, как правило, не образуют взвесей. Т.е. в составе гранулы можно выделить каркас, который не обладает активными свойствами, и поверхностно-активную поровую суспензию.

На начальном этапе процесса гранулирования жидкая фаза находится в виде адсорбированных пленок, влаги смачивания и капиллярно-стыковой влаги в местах соприкосновения зерен исходной смеси. В процессе она переходит в поры гранул, меняя свое состояние на фуникулярно-капиллярное.

В процессе гранулирования газовая фаза частично отводится из пространства между частицами вещества исходной смеси. Небольшая доля газовой фазы может присутствовать в сырой грануле, а также может быть растворена в жидкости. Таким образом, пока сохраняется трехфазность дисперсной системы, существенное воздействие на гранулу оказывают капиллярные силы. Трехфазность может сохраняться в готовой грануле и на этапе ее образования.

Как отмечалось выше, в процессе гранулирования происходит уплотнение вещества дисперсной системы. Решающим фактором здесь выступают гравитационные силы, обусловленные весом частиц гранулята, и центробежные силы, создаваемые вращающимися частями гранулятора. При этом характерна высокая степень свободы объемной деформации каждой отдельной гранулы. Связность гранул при этом может быть сохранено только посредством пластического характера деформаций.

Однако комкуемым материалам не свойственна пластичность. Зерна гранул имеют достаточно жесткий каркас. Их пластический сдвиг может происходить при наличии суспензии в порах гранулы. Суспензия может быть рассмотрена как коагуляционно-структурированная пластичная масса. Таким образом, комкуемость дисперсного материала определяется наличием в порах суспензии, обладающей определенными реологическими и коллоидно-химическими свойствами. Коагуляционно-структурированные суспензии с небольшой концентрацией твердой фазы представляют собой, как правило, двухфазные системы. Повышение содержания частиц твердой фазы суспензии вызывает изменение ее свойств, т.е. для суспензии будут характерны свойства однофазного полутвердого тела с высокими значениями вязкости и поверхностного натяжения.

Соответственно, прочность суспензии как псевдо-фазы обусловлена молекулярными ван-дер-ваальсовскими силами.

Рассмотренные изменения свойств поровой суспензии вызывают значительное снижение подвижности поровой массы в структуре гранулы в процессе ее формирования и выводят влияние капиллярного взаимодействия с зернами каркаса на первый план по сравнению с действием сил взаимодействия на молекулярном уровне. Можно говорить о том, что капиллярно-молекулярный механизм определяет прочность сырой гранулы.

Каркас зерен составляет основную часть комкуемой дисперсной системы, поэтому принимает непосредственное участие при возникновении максимально плотной укладки в процессе ее формирования и обеспечивает значительную адгезионную способность поверхности зерна к поровой суспензии и псевдо-фазе поровой массе.

Кинетика процесса образования гранул и удельная производительность технологического оборудования для гранулирования пищевых продуктов во многом определяется водно-физическими и структурно-механическими свойствами влажных дисперсных систем, в частности, способностью к комкованию. Начальный этап образования гранул может быть охарактеризован скоростью капиллярного перемещения порового раствора и поровой суспензии в слое каркасных зерен. Следующая технологическая стадия – закрепление гранул – обусловлена кинетикой коагуляционного структурообразования поровых суспензий.

Разрушение влажного капиллярно-пористого вещества в процессе сушки, вызванное капиллярным массообменом, в значительной мере определяется структурно-механическими его свойствами. В случае наличия в каркасе гранулы быстрорастворимого вещества или компонента, склонного к набуханию, разрушение гранулы происходит из-за их растворения или клейстеризации, что ведет к увеличению удельного содержания жидкой фазы. Поэтому, очевидно, термостойкость сырого гранулята также зависит от комкуемости сырьевых

дисперсных материалов, их растворимости при заданной температуре сушки, присутствия белковых и других связующих компонентов.

Гипотетические утверждения, доказательство которых выполняется в экспериментальной части диссертационного исследования, позволяют установить основные закономерности формирования состава и структуры быстрорастворимых многокомпонентных напитков, разработать методики оценки комкуемости дисперсных материалов и расчета основных технологических параметров процесса гранулирования, что способствует разработке инновационных способов гранулирования и сушки.

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 сывороткосодежащих напитков;

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

Таким образом, методологическая основа проводимых в диссертации исследований, – 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 процессов структурообразования микро- и макроструктур гранулируемых материалов.

Глава 2. МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ПРОИЗВОДСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ КОНЦЕНТРАТОВ НАПИТКОВ

Системный подход широко применим во многих направлениях научных исследований ввиду того, что современная наука часто при исследовании протекания процессов в системах различной природы рассматривает их как систему, или поток, процессов, учитывая их сложность. Использование системного подхода также приводит к тому, что отдельные, не зависимые и не связанные между собой задачи, решение которых направлено на улучшение целостности и качества потока процессов, рассматриваются как система задач. Для развития технологий характерна следующая система задач: анализ и синтез системы технологических процессов, выявление факторов, которые способствуют ее распаду на составные части, и устранение таких факторов существующими в современной науке методами.

Из уровня развития современной науки широко известна и востребована системология пищевой и перерабатывающей отраслей промышленности, основоположником которой является академик РАН В. А. Панфилов [219]. Базис данной методологии составляет системный подход, адаптированный к решению задач агропромышленного комплекса.

Методология системного подхода успешно применима при создании новых технологий производства продуктов питания функционального назначения, в частности, быстрорастворимых продуктов питания. Внедрение методов системного анализа позволяет существенно повысить эффективность этапов их разработки: научные изыскания, проектно-конструкторские работы.

Терминология теории систем [242], главным образом, применима в химической отрасли. Основными понятиями считаются «технологический процесс», «технологическая операция», «производственный участок», «сырье» и т.д. Они могут быть выражены в терминах системной методологии в той или иной

степени. Распространение терминологии теории систем в настоящее время характерно для широкого спектра отраслей промышленности. Это позволяет рассмотреть процессы и явления, характерные для данного производства, по аналогии с другими отраслями, в частности, химической. Использование терминологии теории систем позволяет устранить многие неопределенности и внутренние противоречия, возникающие при исследовании систем и процессов, выстроить логику их описания и взглянуть на них по-новому.

2.1 Понятия и определения системологии

Центральным понятием системного подхода является «система». Под ней понимают некоторое множество элементов, разнородных по своей природе, упорядоченных каким-либо образом, между которыми существуют взаимосвязи различного характера – информационные, технологические, энергетические и т.п. Элементы системы образуют единство, тем самым определяя целостность системы. Особенностью системы считается наличие у нее свойств, обусловленных не только свойствами входящих в нее элементов, но и свойств, возникающих в процессе их взаимодействия. Т.е. свойства системы всегда больше суммы свойств входящих в нее элементов.

Обособленную часть системы, входящую в ее состав, называют «элементов». При этом считается, функциональное назначение система приобретает, благодаря взаимодействию элементов.

В результате взаимодействия элементы, реализующие отдельную функцию системы, могут образовывать некоторые «подсистемы».

Система – это организованная совокупность элементов. Организованность системы может быть выражена пространственной и временной согласованностью ее элементов и подсистем. Взаимоотношения системообразующих элементов должны быть выражены посредством упорядоченных связей.

Системы, как правило, характеризуются иерархичностью, иначе соподчиненностью отдельных ее элементов и подсистем. Так, например,

подсистему можно рассматривать как систему низшего порядка по отношению к исследуемой системе. В свою очередь, подсистема состоит из элементов, которые также рассматриваются в качестве системы низшего порядка, тогда как подсистема является системой высшего порядка по отношению к элементам. При рассмотрении технологической системы в качестве элемента может быть определена, например, технологическая операция. Её декомпозиция будет означать переход к физико-химическим системам, которые будут являться системами низшего порядка по отношению к технологической операции. При членении системы на подсистемы следует учесть, что их системообразующая роль различна, поэтому среди них может быть выделена центральная часть, изменение которой ведет к изменению назначения системы в целом.

Неотъемлемой составляющей любой системы является понятие «связи». Именно связь определяет целостность системы, возникновение и сохранение ее структуры и свойств. По характеру связи могут быть энергетическими, информационными, материальными, что определяет, в свою очередь, особенность взаимодействия элементов, между которыми эта связь возникает.

Поскольку система взаимодействует с внешней средой, то одним из основных понятий становятся «вход» и «выход». Они также возникают вследствие необходимости материального, энергетического, информационного и т.п. обмена.

Центральным понятием системного подхода считается «эмерджентность» системы. Именно она отражает целостность системы, т.е. взаимосвязь преобразования, передачи, хранения сигналов (материальных, энергетических, информационных и др.), участвующих в процессах, протекающих в системе, а также качество управления этими процессами.

Методологическую основу системного подхода составляют следующие основные этапы: выявление, анализ, в некоторых случаях прогнозирование противоречий, которые порождают проблему; постановка целей, способствующих устранению проблемы; выбор критериев достижения поставленных целей; всесторонний анализ проблемы, требующей решения; определение требований к

технологическому процессу с учетом его динамики; генерирование альтернатив возможного поведения системы, развития ее процессов; оценка альтернатив; выбор альтернативы с учетом критериев достижения целей; определение направления развития системы и способа ее функционирования; определение структуры системы, необходимой для ее развития и функционирования; выбор алгоритмов управления поведением системы. Последовательность указанных этапов нацелена на получение проектного образа технологического потока.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что системология базируется на понятии «система» как целостного структурированного определенным образом объекта, который состоит из относительно самостоятельных и условно неделимых элементов и образованных ими подсистем, взаимодействующих между собой и окружающей средой посредством энергетического, информационного и материального обмена, и имеет четкую целенаправленность, обусловленную его функциональным назначением.

2.2 Системность производства быстрорастворимых гранулированных напитков

Быстрорастворимые гранулированные напитки (БГН) представляют собой многокомпонентные полидисперсные физико-химические системы, т.е. относятся к классу сложных систем. В связи с этим использование системологии при их исследовании и решении задачи повышения их качества и функциональности является не только желательным, но и обязательным. Технологический поток производства БГН является, с точки зрения системологии, сложной системой, включающей в себя в качестве подсистем или элементов технологические линии или отдельные технологические операции, каждую из которых, в свою очередь, можно рассматривать как систему процессов. Системный подход позволяет рассмотреть технологический поток как взаимосвязанную, единичную, динамичную систему, состоящую из элементов, имеющих различную природу, но, тем не менее, образующих органичное единство. Такая система

характеризуется системным качеством, не присущим ни одному из ее элементов или подсистем. Системология позволяет вскрыть строение технологического потока, изучить его состав и структуру, установить взаимосвязи элементов и подсистем и перейти от анализа технологического потока к его синтезу. В то же время, системология рассматривает технологический поток как единое целое, сложное и комплексное.

Системный подход при исследовании технологических потоков производства БГН предусматривает использование принципа многоуровневой декомпозиции. Данный принцип предполагает поэтапное деление целого (сложной системы) на взаимосвязанные компоненты (подсистемы или элементы) с повышением степени детализации от этапа к этапу.

Многоуровневая декомпозиция при создании высокоэффективных технологических систем предусматривает переход от этапа, на котором в качестве объекта исследования рассматривается система технологий, к этапу, объектом изучения которого является система процессов, и далее к этапу, который предполагает изучение системы машин. Наиболее наукоемким с позиций исследования является система процессов.

Исследование технологических процессов производства БГН на основе методологии системного подхода предусматривает использование принципа модульности. Можно говорить о том, что сложный технологический процесс производства БГН состоит из отдельных модулей. Каждый модуль имеет в основе какие-либо физико-химические процессы или явления. Предполагается соподчиненность модулей, что позволяет им образовать уровни иерархии в составе сложной системы. Также можно с уверенностью сказать, что технологический поток – единая система технологических операций, объединенная в совокупность технологических процессов, осуществляемых на специализированных производственных линиях.

Если рассмотреть иерархичность исследуемой системы, то явно выделяется низший уровень – физико-химическая система, представляющая собой взаимосвязанный набор известных физико-химических процессов. Причем

именно при их членении до уровня простейших физических или химических явлений возникает возможность представления физико-химических процессов как сложных систем. Верхний уровень представлен, как правило, организационными системами. Однако, поскольку диссертационное исследование имеет технологическую направленность, в нем показаны лишь взаимосвязи, характерные для уровня физико-химических и технологических систем.

Для таких систем границы внешней среды могут быть обозначены потребителем и сырьевой базой. Сырьевая база оказывает непосредственное влияние на состав готового продукта (минералогический, витаминный и пр.) и его качество. Потребительский рынок формирует требования к рецептуре и качеству гранулометрического состава быстрорастворимых гранулированных напитков.

2.3 Стрoение технологической системы

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. Автором диссертационного исследования выбрана операторная модель, которая позволяет отобразить строение сложной системы и применить методологию системного подхода для ее анализа и синтеза.

Как известно, системный анализ – один из основополагающих этапов системного подхода, который предполагает членение объекта исследования (сложной системы) на взаимосвязанные элементы с сохранением ее структуры и последующим изучением функций, выполняемых каждым элементом. Основной операцией данного этапа системного подхода является декомпозиция, которая осуществляется с учетом состава системы и имеющихся взаимосвязей элементов.

Системный анализ является начальным, первичным этапом изучения сложной системы. За ним следует этап синтеза, который решает основную задачу научного исследования – выявление интегративных закономерностей целостной системы.

Под синтезом понимают объединение (мысленное, физическое) частей сложной системы, которые были выделены на этапе системного анализа. Синтез позволяет установить закономерности функционирования технологической системы как единого целого на основе взаимодействия ее элементов. Благодаря этому может быть обоснованно выбрано направление развития сложной системы или осуществлен ее вывод на оптимальное функционирование.

Исследуемый технологический поток с позиций операторной модели может быть представлен в виде определенного количества модулей и подсистем, которые характеризуются параметрами входа и выхода. Аналогично подсистемы представляют в виде совокупности технологических операций (операторов), которые, в свою очередь, могут быть представлены типовыми процессами (химическими, физическими, физико-химическими, биологическими и пр.) [219]. Принятые условные изображения процессов показаны в таблице 2.1.

Известный набор операторов [219] расширен автором диссертационного исследования путем добавления оператора стабилизации размеров и формы, который используется для описания процесса формообразования. Обозначения типовых процессов (процессоров) позволяют сформировать графическое отображение любой технологической операции.

Формирование общей схемы технологического процесса предполагает объединение приведенных выше графических элементов стрелками, которые отображают их взаимосвязь и направление материального, энергетического или информационного потока между ними. Заметим, что в полученной операторной модели достаточно отобразить только материальные потоки между отдельными типовыми технологическими процессами, а также образующими их подсистемами и технологическими операциями [240].

Набор рассмотренных процессоров достаточен для реализации информационных моделей технологических потоков любой сложности, поскольку

содержит операторы, описывающие всю совокупность типовых технологических воздействий. Таким образом, операторный метод применим при проектировании технологического потока, в частности, производства БГН.

Таблица 3.1 – Процессоры

Графическое изображение процессора	Назначение процессора
	Дозирование
	Ориентирование
	Резервирование
	Формообразование
	Стабилизация размеров и формы
	Изменение агрегатного состояния
	Нагревание
	Охлаждение
	Термостатирование
	Преобразование физико-химических свойств
	Измельчение
	Соединение с сохранением поверхности раздела
	Соединение без сохранения поверхности раздела
	Разделение

Основной целью проектирования технологии производства БГН с позиций их многокомпонентности и полидисперсности является обеспечение их качества. Для достижения поставленной цели автором предложено в качестве основного математического аппарата использовать положения теории механики сплошных сред с сочетанием принципа «кубика Рубика» для сборки отдельных модулей математической модели.

Таким образом, можно заключить, что решение научных и исследовательских задач агропромышленного комплекса, в частности, его

перерабатывающих отраслей, в настоящее время успешно осуществляется с применением принципов системологии [215]. Методология системного подхода, адаптированная для решения задач перерабатывающего производства, позволяет выполнить анализ, диагностику и синтез технологических систем, рассматривая их при этом как иерархические совокупности подсистем, с одной стороны, и как единую и целостную их конструкцию, стабильность которой подтверждается экспериментально, с другой стороны. Результаты системного анализа позволяют спрогнозировать поведение технологической системы и выявить направления ее оптимизации и совершенствования. Для системного подхода характерна итеративность. Процесс оптимизации структуры технологической системы неразрывно связан с рассмотрением физико-химических систем в ее составе. Совершенствование технологического потока возможно лишь при переходах между иерархическими уровнями: система технологий – система процессов – система машин.

2.4 Строение физико-химической системы

Типовыми процессами технологии производства многокомпонентного полидисперсного пищевого продукта можно считать измельчение и смешение его компонентов, их коалесценцию, коагуляцию и конденсацию. Детализация типовых процессов технологии позволяет представить ее как сложную физико-химическую систему (ФХС).

Начальный этап системного анализа ФХС предполагает выделение смыслового и математического аспектов функционирования ее подсистем. Такой подход позволяет провести качественный анализ структуры и физических, химических, механических процессов ФХС.

На этапе качественного анализа структуры ФХС с позиций смыслового аспекта выполнен априорный анализ физико-химических процессов, лежащих в основе структурирования и формообразования гранул БГН. На данном этапе выявлены и проанализированы возможные явления и эффекты, возникающие и

сопровожающие процессы формирования свойств «instant» продукта, влияние которых на ход процесса существенно [229].

Математический аспект качественного анализа заключается в изучении структуры математических описаний и подходов, которые применимы для моделирования процессов формирования структуры, размера, прочности, пористости и других свойств гранул в составе гранулированного напитка.

Как правило, в процессе образования гранул участвуют твердые (Т), жидкие (Ж) и газообразные (Г) компоненты различной степени дисперсности. Поэтому следует детально изучить явления и эффекты, происходящие при их взаимодействии, т.е. при их измельчении и смешивании, а также формировании гранулы под воздействием механических, физических и химических факторов внешней среды. Принято выделять следующие иерархические уровни:

1 – микроуровень, который представлен явлениями, характерными для локальных объемов технологических аппаратов, например, измельчение, смешение, коагуляция и сушка;

2 – макроуровень, включающий те же явления, но в полном объеме технологического аппарата, и учитывающий взаимодействие агломератов частиц продукта между собой, т.е. с подобными подсистемами, и с конструктивными элементами технологического аппарата.

Микроуровень исследует процесс формообразования гранул, макроуровень рассматривает аспекты производительности и управления процессами измельчения, смешения, коагуляции и сушки, ориентируясь на фазовые характеристики компонентов, а также с учетом структурно-энергетического параметра системы и степени перестройки ее структуры.

ФХС может быть представлена в виде совокупности твердой, жидкой и газообразной (Т + Ж + Г) фаз и их взаимосвязей. Тогда сумма коэффициентов присутствия указанных фаз $K_T + K_J + K_G = 1$. Каждый компонент ФХС может быть формально выражен механическим, физическим или химическим эффектом. В диссертационном исследовании рассматривается многокомпонентная полидисперсная ФХС, состоящая из трех фаз. Количество компонентов при этом

может быть различным в зависимости от рецептуры пищевого концентрата, однако степень их дисперсности должна соответствовать требованиям, определенным технологией, технологическими признаками, строением и аппаратурным оформлением технологического потока (глава 3).

Для успешного внедрения результатов системного исследования необходимо заранее подготовить его структуру к перестройке с целью возможности количественной оценки входных и выходных переменных технологического процесса на разных иерархических уровнях, а также количественной оценки синергетического взаимодействия уровней.

2.5 Организация, схема и методы исследований

Теоретические и экспериментальные исследования выполнены в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.1.

Исследования проведены в условиях научно-исследовательских лабораторий Кемеровского государственного университета. На основании полученных результатов разработаны технологии производства БГН, предложены конструкции грануляторов, обладающие технической новизной. Закономерности процесса гранулообразования, выявленные теоретическим и экспериментальным методами, а также методы диагностирования центральных подсистем в составе технологических потоков апробированы в условиях производства ООО «Научно-производственное объединение «Здоровое питание» (г. Кемерово) и ООО «Биоцен» (г. Томск).

Начальный этап диссертационного исследования посвящен проработке элементов концепции направленного структурирования многокомпонентных напитков функционального назначения на основе натурального сырья, обладающих instant-свойствами. Методологической основой данного этапа исследования является системология, основные положения которой изложены в разделах 2.1–2.3. Данный этап предполагает проведение исследований технологических процессов концентрирования смеси соков, содержащих мякоть

плодов и ягод, с молочной (творожной) сывороткой, возможности их смешивания с гигроскопичными порошками различной степени дисперсности и коагуляции в рамках формования гранул с заданными свойствами и структурой.

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 формования гранул
Научное обоснование и разработка рецептур и технологии и специализированных гранулированных завтраков			
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 2.1 – Схема проведения исследований

Следующий этап диссертационного исследования базируется на результатах применения методологии системного подхода к технологии производства БГН и имеет целью создание универсального технологического потока их производства. Универсальность разработанного технологического потока обеспечивается иерархичностью производства БГН с постоянным переходом от уровня системы технологий к уровню системы процессов, и наоборот. Объектом исследования

данного этапа является физико-химическая дисперсионная система, предметом исследования – её функционирование в процессе коагуляционного формообразования и при переходе к конденсационному и коагуляционно-конденсационному состояниям. Разработаны и исследованы информационные модели технологических модулей. Основным аппаратом оптимизации полученных математических моделей выбран принцип сборки «кубика Рубика», который успешно апробирован в таких отраслях промышленности как металлургия, химическая отрасль (химия удобрений, химия силикатов), почвоведение и пр. Данный принцип рассматривает объект моделирования через синергетическое взаимодействие технологий, процессов и информации [40-68].

В качестве объектов исследований выбраны:

- сыворотка молочная (творожная) свежая (ОСТ 10-02-3-87);
- сыворотка молочная (творожная), сгущенная до 40-75% сухих веществ;
- сыворотка молочная (творожная) сухая порошкообразная (ТУ 49 800-81);
- сыворотка молочная (творожная) сухая гранулированная (ТУ 9299-55-020068456-2000);
- концентрированные ягодные и фруктовые соки ТУ (ГОСТ 18192-72);
- фруктово-ягодные кисели (ТУ 9195-47-02068315-2012).

При проведении экспериментальных исследований учтено, что свойства изучаемых систем находятся под влиянием внешних факторов. Поэтому особое внимание уделено исследованиям динамики физико-механических и физико-химических свойств сырья для производства гранул БГН на протяжении всего технологического процесса, включающего операции смешивания, гранулирования и сушки.

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 применением проверенных методик и современного программного обеспечения.

Рассмотрим нормативную базу, составляющую основу экспериментальных исследований:

- ГОСТ 87562-70 – определение массовой доли сухих веществ, содержащихся в концентрированных соках и молочной (творожной) сыворотке (рефрактометрический метод);
- ГОСТ 8763-73 – определение индекса растворимости, органолептических показателей, кислотности сыворотки;
- ГОСТ 18192-72 – определение индекса растворимости, кислотности, органолептических показателей плодово-ягодных соков;
- ГОСТ 23327-78 – определение содержания азотистых веществ (пересчет на белок);
- ОСТ 4963-85 – определение содержания лактозы (метод Бертрана, метод Щоорма);
- ГОСТ 8756.2-82 – определение содержания растворимых сухих веществ в соках;
- ГОСТ 25555.3-82 – определение содержания минеральных примесей;
- ГОСТ 25555.3-82 – определение наличия примесей растительного происхождения;
- ГОСТ 29927, 26930..26934 – определение содержания токсичных элементов;
- ГОСТ 9225 – определение значений микробиологических показателей.

Оценка количественного и качественного состава свободных аминокислот проводилось спектрофотометрическими методами, предложенными СибНИПТИЖ ВАСХНИЛ (г. Новосибирск). Патогенная микрофлора определена по методам Госсанэпиднадзора. Наличие посторонних примесей (за исключением минеральных примесей и примесей растительного происхождения) определялось визуально.

Также в диссертационном исследовании использованы положения международных стандартов:

- ИСО/Р-565-ТС-24 – определение гранулометрического состава гранулированного порошка сыворотки: выбран метод ситового анализа с

применением сеток (тканых или металлических), перфорированных пластин для лабораторных сит;

– СЭВ РС-1174/17 «Испытания материалов. Ситовой анализ состава зернистых материалов». Использован набор стандартных сит с номинальными отверстиями диаметром 0,7; 1,2; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 мм. Гранулы продукта предварительно были высушены до содержания сухого вещества 97,5-98% по массе. Затем отбирались три пробы весом по 500 г. Каждая проба просеивалась в течение 300 с. Оставшаяся на сите часть пробы взвешивалась на весах ВТК-500, точность взвешивания которых 0,05 г.

Определение значений пористости полученных гранул БГН осуществлялось по известным методикам [25,29,69,70,128,137,156,322,324,350,378]. Кратко рассмотрим методику: лабораторная колба заполняется дистиллированной водой, в колбу помещается гранула БГН, колба немедленно закрывается пробкой. Фиксируется уровень дистиллированной воды в колбе после помещения в нее гранулы. Колба помещается в среду с температурой 20°C до полного растворения гранулы. При этом выделяется воздух, первоначально содержащийся в грануле. Выделение воздуха способствует понижению уровня дистиллированной воды в колбе на этапе растворения гранулы. Затем уровень остается неизменным. Таким образом может быть определен объем воздуха, находящегося в грануле, как разница между начальным и конечным значениями уровня.

Оценка прочности полученных гранул на раздавливание проводилась с применением прибора «Структурометр СТ-2».

Насыпная плотность сухой гранулированной молочной (творожной) сыворотки определялась следующим образом. Порошок сыворотки засыпается в мерную емкость 250 см³. Насыпная плотность определяется как частное от деления массы пробы на ее объем.

Получены значения капиллярной пропитки и капиллярной влажности в соответствии с известными методиками, представленными в [1,2,8,11,24,161]. Основу методик составляет исследование кинетики капиллярной пропитки слоя дисперсной среды для разной степени ее уплотнения (приложение I).

Исследована пластическая прочность полученных гранул. Значения пластической прочности определены согласно методикам, предложенным П. А. Ребиндером [249], с применением прибора «Структурометр СТ-2».

Проводились компрессионные испытания полученных дисперсных масс. Лабораторная установка для проведения компрессионных испытаний укомплектована пресс-формой с отверстием. Момент сжатия дисперсной массы до критического двухфазного состояния устанавливается по оттоку жидкости из отверстия. Перед сжатием устанавливалось значение удельной поверхности дисперсной смеси на приборе ПСХ-2. Принцип измерения прибора основан на измерении скорости фильтрации воздуха через слой дисперсной среды.

Значения наименьшей капиллярной влажности и оценка влияния содержания смеси на фильтрационное перемещение влаги в дисперсных массах установлены методом влагоемких сред Лебедева-Васильева, подробно изложенным в [39, 46, 85, 140]. В первом случае экспериментального исследования согласно выбранной методике использован шаблон, толщина которого составила 1 мм, во втором случае выбран шаблон толщиной 5 мм.

Для количественного определения соотношения между содержанием жидкой и твердой фазами дисперсионных систем использована модель Терцаги-Бернея [137,366] и метод компрессионного уплотнения.

В экспериментальных исследованиях для определения влияния давления на скорость истечения влаги использован капиллярный вискозиметр КВ-2. Метод усовершенствован и адаптирован для мелкодисперсных суспензий и подогретых растворов.

Процесс гранулирования проведен в периодическом режиме с применением разработанных автором диссертационного исследования новых конструкций грануляторов в условиях НПО «Сфера» и ООО «Биоцен». Экспериментальные исследования проводились на традиционных грануляторах известных конструкций и на модернизированных грануляторах, конструкции которых дополнены активатором, управляющим процессом гранулообразования (патент № 2001123756/12025316).

Для установления количественного значения чувствительности влажного материала к сушке использована методика Носовой-Чижского [232]. В качестве «спутника» выбрана сахарная пудра, которая характеризуется высоким значением увлажняющей способности. Использование сахарной пудры позволяет повысить скорость оттока влаги из гранул на периферию.

В результате проведения экспериментальных исследований рассмотренных этапов диссертационного исследования установлено, что качество структурирования гранул БГН обеспечивается за счет центральных подсистем «С» (гранулирование) и «В» (сушка) технологического потока. На основании этого вывода на следующем этапе диссертационного исследования установлено воздействие, оказываемое на производительность технологического потока геометрическими, технологическими и конструктивными факторами. Также в рамках данного этапа выполнен аналитический обзор методов и технологий моделирования рецептур и технологических потоков производства специализированных МППК.

Проведенный комплекс исследований позволил разработать модель процесса гранулирования. Исследование откликов на воздействие со стороны геометрических, технологических и конструктивных факторов проводилось описанными выше методами: оценка производительности, ситовой анализ, определение прочности и приобретенности instant-свойств.

Цель заключительного этапа диссертационного исследования состояла в разработке усовершенствованного технологического потока при производстве БГН с управляемым процессом гранулообразования посредством активатора, предусмотренного конструкцией гранулятора. Технологические режимы процесса гранулообразования выбраны на основе результатов моделирования с учетом синергетического взаимодействия систем. Результат получен, благодаря исследованию физико-химической системы совместно с системами технологий и процессов, а также исследованию переходов от указанных систем к системе машин и аппаратов.

Рассмотрим нормативную базу, составляющую основу экспериментальных исследований заключительного этапа диссертационного исследования:

– ГОСТ 19215, 20450, РСТ РСФСР 27, РСТ РСФСР 31 – формирование и отбор пробы свежих ягод [40-62];

– ГОСТ 28561 – определение содержания сухих веществ в свежих и высушенных ягодах, выжимках (взятых из средней пробы) осуществлялось высушиванием до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 105°C [46];

– ГОСТ 15113.4 – определение массовой доли влаги в быстрорастворимых гранулированных завтраках [45–48];

– ГОСТ 28562 – определение массовой доли растворимых сухих веществ в экстрактах [57–59];

– ГОСТ 8756.13 – определение содержания углеводов в свежих и высушенных ягодах, экстрактах, выжимках [89];

– ГОСТ 15113.6 – определение содержания углеводов в БГН и завтраках [62];

– ГОСТ 25555.0 – определение титруемой кислотности (пересчет на яблочную кислоту) в свежих и высушенных ягодах, экстрактах, выжимках и напитках [56];

– ГОСТ 15113.5 – определение титруемой кислотности завтраков [60];

– ГОСТ 29059 – определение наличия пектиновых веществ в свежих и высушенных ягодах, экстрактах, выжимках (титриметрический метод) [42–46];

– ГОСТ 8756.11 – определение наличия пектиновых веществ в БГН и завтраках [52];

– ГОСТ 25999 – определение наличия тиамин и рибофлавина в свежих и высушенных ягодах, выжимках [47];

– ГОСТ 24556 – определение наличия витамина С в свежих и высушенных ягодах, экстрактах, выжимках, БГН и завтраках [49];

– содержание биофлавоноидов (по рутину) в свежих ягодах, высушенных ягодах и выжимках, экстрактах, быстрорастворимых завтраках и напитках определялось спектрофотометрическим методом [278]: содержание флавонолов, катехинов, лейкоантоцианов в свежих ягодах, высушенных ягодах и выжимках определялось

фотоколориметрическим методом [314], антоцианов – спектрофотометрическим методом [335].

– ГОСТ 24027.2-80 – определение наличия дубильных веществ в свежих и высушенных ягодах, экстрактах, выжимках (метод Левенталя) [43,54];

– массовая доля β -каротина в свежих ягодах, высушенных ягодах и выжимках, экстрактах, быстрорастворимых завтраках и напитках определялась методом калориметрического титрования [280]; содержание филлохинона в свежих ягодах, высушенных ягодах и выжимках определялось спектрофотометрическим методом [336].

– ГОСТ Р 50479 – определение наличия никотиновой кислоты в свежих и высушенных ягодах, выжимках [57];

– ГОСТ 25555.4 – определение наличия золы в свежих и высушенных ягодах, выжимках [52];

– ГОСТ 26928 – определение наличия железа в свежих и высушенных ягодах, выжимках [56];

– ГОСТ 26927 – определение безопасности завтраков и напитков по содержанию ртути [55];

– ГОСТ Р 51301 – определение безопасности завтраков и напитков по содержанию свинца и кадмия [68];

– ГОСТ Р 51962 – определение безопасности завтраков и напитков по содержанию мышьяка [69];

– ГОСТ 26668-90 – формирование и отбор пробы для анализов на наличие микробиофлоры [4];

– ГОСТ 26670-90 – методика культивирования микроорганизмов для анализов на наличие микробиофлоры [54];

– ГОСТ 10444.12, 10444.15, ГОСТ Р 50474, 50480 – определение микробиологических показателей [42–62];

– ГОСТ 15133.3 – методика органолептической оценки качества завтраков и напитков [33];

– ГОСТ 6687.5 – методика органолептической оценки качества экстрактов [33].

Результаты диссертационного исследования подтверждены использованием современных методов и методик:

- метод Кьельдаля (метод модификации) – определение содержания азотистых веществ в свежих и высушенных ягодах, выжимках, быстрорастворимых завтраках, напитках [4];

- весовой метод – определение содержания клетчатки в свежих и высушенных ягодах, выжимках [179,180];

- спектрофотометрический метод – определение содержание биофлавоноидов (по рутину) в свежих и высушенных ягодах, выжимках, экстрактах, быстрорастворимых завтраках, напитках [224], филлохинона в свежих и высушенных ягодах, выжимках [232], антоцианов [232];

- объемный метод – определение содержания кальция и магния [232];

- кобальт-нитритный метод – определение содержания калия [232];

- метод пламенной фотометрии – определение содержания натрия [232];

- фотоколориметрический метод – определение содержания флавонолов, катехинов, лейкоантоцианов в свежих и высушенных ягодах [232];

- калориметрический метод – определение содержания фосфора [232];

- метод калориметрического титрования – определение массовой доли β -каротина [90].

Определение массовой доли ягод (свежих, перезревших, не достигших съемной зрелости, с механическими повреждениями) выполнено методом взвешивания при температуре, рекомендованной для транспортирования и хранения продукта. Результат взвешивания пересчитывался в проценты от массы объединенной пробы [179,180].

Наличие в продуктах посторонних примесей определялось визуально.

Определения теоретической пищевой и энергетической ценностей продуктов проводилось с использованием коэффициентов энергетической ценности, предложенные Институтом питания РАН [185,188].

Гранулометрический состав сухих быстрорастворимых гранулированных продуктов оценивался методом ситового анализа с учетом международных

стандартов ИСО/Р-565-ТС-24 (сетки металлические, тканые и пластины перфорированные для лабораторных сит, номинальные отверстия); СЭВ РС – 1174/17 (Испытания материалов. Ситовой анализ состава зернистых материалов). Для анализа использовались наборы стандартных сит. Из партии полученных гранул, высушенных до массовой доли сухого вещества 91–94 %, отбиралось три пробы. Масса каждой пробы составляла 500 гр. Время просеивания – 300 секунд на лабораторном отсеиве. Остатки на ситах взвешивались на технических весах ВТК-500 с точностью до 0,05 г [189].

Насыпная плотность гранулированных экстрактов и завтраков измерялась как частное от деления массы навески на объем мерного стакана [4].

Определение значений пористости полученных гранул БГН осуществлялось по известным методикам [238]. В эксперименте использовалась лабораторная колба 100 мл с резиновой пробкой и микробюретка 2 мл, цена деления 0,02 мл [238]. Колба заполняется дистиллированной водой, в нее помещается гранула БГН. Колба плотно закрывается резиновой пробкой. Фиксируется уровень дистиллированной воды в микробюретке после помещения в нее гранулы. Колба помещается в среду с температурой 20°C до полного растворения гранулы. При этом выделяется воздух, первоначально содержащийся в грануле. Выделение воздуха способствует понижению уровня дистиллированной воды в колбе на этапе растворения гранулы. Затем уровень остается неизменным. Таким образом может быть определен объем воздуха, находящегося в грануле, как разница между начальным и конечным значениями уровня.

Оценка прочности гранул на раздавливание проводилась на анализаторе текстуры «Структурометр СТ-2» [252].

В ходе экспериментальных исследований БГН и завтраков определена продолжительность растворения пробы гранул в горячей воде [291]. Проба гранул массой 25 г помещается в стеклянный стакан, заполненный 200 мл воды с температурой 80-90°C, тщательно перемешивается. Продолжительность процесса отмечается по шкале секундомера до полного растворения пробы.

Сыпучесть полученных гранул БГН определяют следующим образом.

Пробу массой 100 г засыпают в чистую сухую стеклянную воронку, угол конуса которой составляет 60° . Воронка имеет срезанный под прямым углом носик. Пробу засыпают на расстоянии около 3 мм от конца конуса воронки. Диаметр отверстия воронки составляет 20 мм. Воронка крепится в штатив с электровибрирующим устройством, частота выходных колебаний которого 100 Гц. Под воронкой помещается цилиндр, в который сыпается проба гранулята. Время, за которое гранулят переместится из воронки в цилиндр, отмеряется секундомером. Рекомендуется провести не менее десяти замеров. Сыпучесть гранулята выражается в граммах в секунду [4].

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ГРАНУЛ СЫВОРОТКОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИЙ

Целесообразность систематизации и обобщения представлений о механизме гранулирования при производстве быстрорастворимых продуктов на основе молочной сыворотки вызвана тем обстоятельством, что все имеющиеся теоретические исследования и экспериментальные данные являются лишь континуумом частных решений. Однако, такой континуум *частных* решений не позволяет выстроить целостную систему, дающую представление о механизмах и процессах создания быстрорастворимых гранулированных сывороткосодержащих продуктов с использованием местного дикорастущего сырья. Наличие функционирующего оборудования, модернизации имеющегося или необходимость в проектировании нового при создании технологических потоков определяют цели и задачи постулируемой математической модели.

В рамках системного анализа (из теории систем) при выборе и осуществлении наилучшего (оптимального) решения был определен дополнительный блок – блок уникального выбора [3,107,175,220,216,240,339]. В данном блоке осуществляются поиск и реализация оптимальных решений управления (в самом широком смысле этого термина) системой.

В условиях существования «уникального выбора» выделяются три основных элемента. Во-первых, это признания существования проблемы (задачи), требующей решения» во-вторых, наличия человека, способного принять решение и осуществить разработку (проектирование, модернизацию) отдельной технологической линии или всего технологического потока; в-третьих, наличие нескольких альтернативных решений проблемы.

Проанализируем принципы систематизации технологий получения инстант-продуктов [5,73,75,270,287].

Выделим особенности и некоторые принципы систематизации, приняв во внимание, что:

– при решении часто повторяющихся задач достаточно корректно использовать принцип подобия, применяя решение одних задач к решению аналогичных;

– особое внимание при проектировании (построении) технологических потоков необходимо уделять решению уникальных, требующих особого внимания задач.

1. Рассматриваемые задачи имеют поликритериальный характер. Решение какой-либо задачи с учетом только одной переменной (одного фактора), например по влажности или размеру гранул, не даёт возможности осуществить полноценный анализ альтернативных проектов. Вместе с тем, нерешенность вопроса о полноте списка показателей (т.е. были ли учтены все существенные факторы), а также сложность оценки (особенно из-за их синергизма) разнородных факторов (например, органолептических показателей и пористости) создают достаточно серьезные проблемы при рассмотрении задач, имеющих поликритериальный характер

2. Рассматриваемые альтернативы характеризуются субъективизмом оценок качества. Такой субъективизм имеет место не только при поликритериальной, но даже и при однокритериальной оценке

При наличии проблем, о которых говорилось выше, найти оптимальное решение становится весьма непростой задачей. Одним из возможных путей решения проблемы оптимального выбора в недалеком прошлом, да и отчасти в наше время, является создание институтов экспертов, которые оценивают, например, органолептические свойства вновь созданных пищевых продуктов. Выбор оптимальных решений, проводимый в настоящее время, основывается на создаваемых мехатронных системах, принимающих во внимание исследования информационных, биотехнологических, физико-химических, физико-механических процессов. Наличие большого количества систематизированных по определенным показателям научных публикаций и патентов позволяет выстроить максимально чёткую «архитектуру» решаемой проблемы. Всё это даёт возможность облегчить поиск оптимального решения при «конструировании» технологических систем (потоков).

Выстроить максимально чёткую «архитектуру», структуру решаемой проблемы – базовая миссия системного анализа. Рассмотрим методы решения проблем аналитического сравнения альтернатив (уникального выбора [230]), общий алгоритм которых представлен на рисунке 3.1.

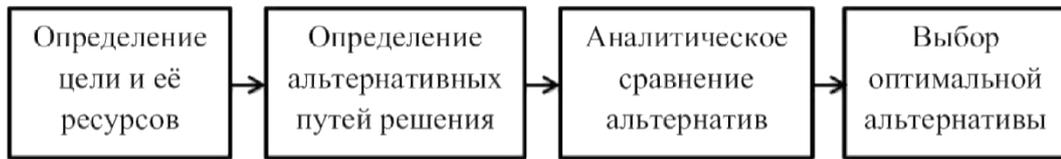


Рисунок 3.1 – Алгоритм действий при решении проблемы

Содержание первого и второго из четырех этапов алгоритма решения проблемы определяется (в основном) её особенностями.

Имеющиеся и прогнозируемые проблемы и узкие места уже на стадии предпроектного проектирования и выдачи технического задания требуют учитывать современный уровень производства, а следовательно, возможность (при необходимости) модернизации имеющегося оборудования, изменение структуры выпускаемой продукции и её тоннаж, соответствие квалификации персонала современным требованиям и др. Пренебрежение, исключение из числа рассматриваемых хотя бы одного или нескольких из этих факторов, может привести к тому, что реализация проекта станет бессмысленной в ближайшем времени. На стадии проектирования должны быть учтены требования по экологической безопасности.

Разрабатываемая мехатронная система характеризуется наличием значительного количества оборудования, технологических операций, взаимосвязей между отдельными процессами и целыми системами. Всё это приводит к тому, что для налаживания безотказной работы создаваемой системы, которая будет осуществлять свои функции по своим «правилам» [219], требуются более значительные затраты как трудовых, так и материальных ресурсов.

Производство быстрорастворимых гранулированных пищевых концентратов, как часть индустрии производства продуктов питания, является системным комплексом, имеющим в своём составе самостоятельные технологические

системы, отдельные подсистемы, процессы, а также систему взаимосвязей между ними.

Объектом исследования при анализе отдельной системы (подсистемы) является структура самой системы (подсистемы), механизм внутренних взаимосвязей, законы коллаборации отдельных подсистем. Изучение системного комплекса предполагает изучение связей и закономерностей взаимодействия между отдельными целостными системами, образующими комплекс.

Подводя промежуточный итог сказанному, отметим, что логика (цикл) создания высокопродуктивного и высокоэффективного производства может быть представлена в следующем виде: «технологический поток → система процессов (наиболее наукоёмкая часть) → система машин» [240, 219, 281].

Для уточнения проблемы развития структурообразования дисперсных (полидисперсных) систем были рассмотрены и проанализированы имеющиеся в литературных источниках данные о гранулообразовании сходных по свойствам материалов как в пищевой [121,240], так и в других, на первый взгляд, не связанных с производством продуктов питания секторах экономики: производство гранулированных удобрений в сельскохозяйственной [116,302] промышленности, различного вида гранул в металлургической [22,24] и особенно гранулированных реактивов в химической [137] промышленности.

В полном объёме проблема с учётом специфики структурообразования (поли)дисперсных систем в производстве продуктов питания может быть уточнена лишь в результате анализа данных, имеющиеся в литературных источниках, после чего устанавливаются цели исследований – всестороннее решение проблем, влияющих на процесс получения гранулированных напитков.

3.1 Исследование влияния технологических факторов на процесс формирования полидисперсных гранулированных продуктов на основе молочной сыворотки

Процесс гранулирования как любой технологический процесс имеет свои особенности. Так предваряет процесс гранулирования (поли)дисперсных систем процесс формообразования смесей. При этом в процессе формообразования смесей им передается не только определенная форма, но и достигаются требуемые технологией геометрические размеры.

Создание условий для обеспечения максимальных формовочных свойств дисперсных (полидисперсных) смесей в связи с тем, что данная операция определяет качество конечного продукта, – это одна из приоритетных научно-производственных задач.

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 [266,268]. Под воздействием внешних факторов (особенно механических воздействий) происходит трансформация формовочной смеси «статической» структуры в смесь «динамическую» с измененными фазовыми и структурными свойствами.

Таким образом приоритетной научно-производственной задачей является анализ и исследование этих трансформаций, а также закономерностей уплотнения влажных дисперсных (полидисперсных) смесей. В таблицах 3.1 и 3.2. представлены результаты определения удельной поверхности для различных смесей, а также истинной плотности. В таблицах содержатся показатели наименьшей капиллярной влажности смесей, используемых в качестве исследуемых материалов перед началом компрессионных испытаний.

Таблица 3.1 – Свойства использованных материалов

N	Материал	S _m , м ² /ку	d _{ср.пов} , мкм	ρ _и , кг/м ³	W _{нкв} , %
1	Смесь № 1	275,0	8,83	1470	14,2
2	Смесь № 2	346,0	6,93	1500	15,7
3	Смесь № 3	571,4	4,04	1600	18,7
4	Смесь № 4	577,4	4,12	1520	17,7
5	Смесь № 5	507,3	4,69	1520	16,7
6	Смесь № 6	521,5	4,36	1640	16,8

Таблица 3.2 – Рецептuru смеси

Компонент	Содержание, %
Сахар	58
Крахмал	20
Шрот аронии	11
Премиксы	0,01 (сверх 100%)
Лимонная кислота	0,05 (сверх 100%)
Сыворотка сухая	11

На рисунке 3.2 представлены результаты компрессионных испытаний шести смесей из таблицы 3.1 соответственно, при критическом давлении.

Анализируя представленные на рисунке 3.2 графики зависимости критического давления прессования при изменении влагосодержания можно сказать, что практически для всех смесей они одинаковы (рисунок 3.2). Данное критическое давление с погрешностью 10–12% может быть описано уравнением:

$$P_{кр} = 33,3 \cdot \frac{W_{нкв}}{W_i - W_{нкв}} \cdot \frac{1}{W_i} \cdot k_{п} \quad (3.1)$$

где: $P_{кр}$ - критическое давление прессования массы, Мпа;

$W_{нкв}$ - наименьшая капиллярная влажность, отн. ед;

W_i - текущее значение влагосодержания массы, отн. ед.

$k_{п}$ – коэффициент, учитывающий содержание поверхностно активных веществ

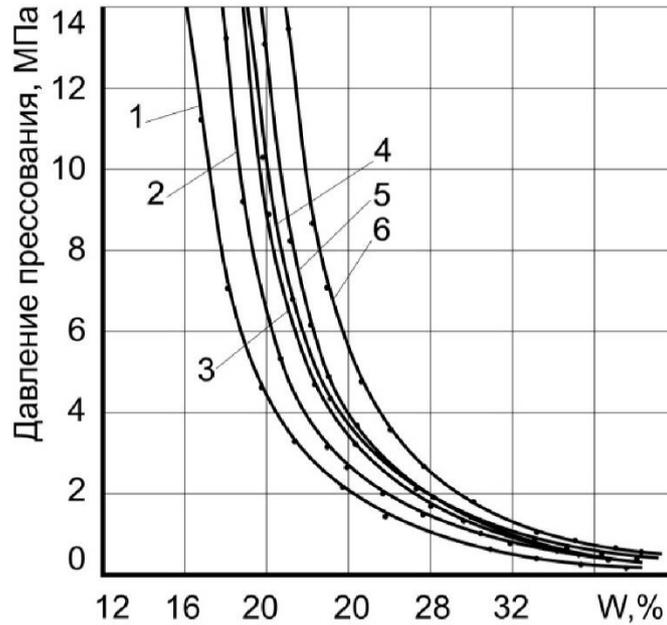


Рисунок 3.2 - Влияние влажности смесей на критическое давление прессования (смеси № 1, 2, 3, 4, 5, 6)

Критическое давление прессования, что следует из уравнения (3.1), есть условное напряжение сдвига массы. Соотношение капиллярно-неподвижной $W_{\text{нкв}}$ к капиллярно-подвижной влаге ($W_i - W_{\text{нкв}}$) определяет зависимость условного напряжения сдвига массы от влагосодержания, но в то же время большое значение имеет содержание поверхностно-активных веществ в виде белковой фракции – сыворотки, обеспечивающей ещё большую вязкость.

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; наличие поверхностно-активных веществ в виде сыворотки обеспечивает ещё большую связность. На рисунке 3.3 представлено соотношение между величиной наименьшей капиллярной влажности твердой фазы и связностью массы, её влагосодержанием.

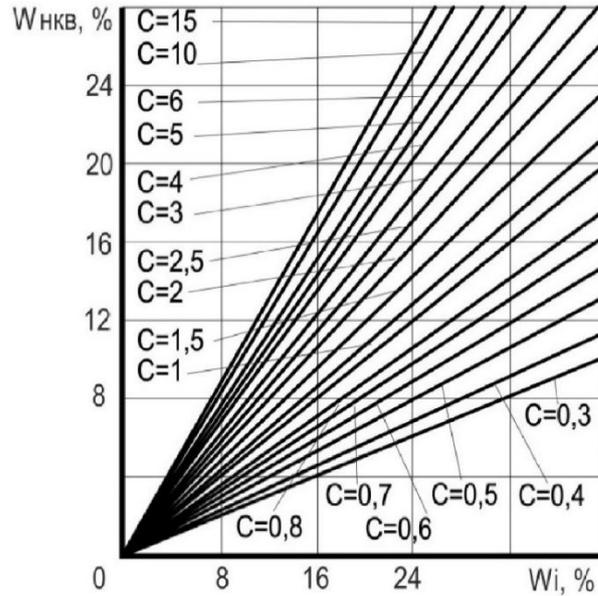


Рисунок 3.3 – Взаимосвязь связности массы с наименьшей капиллярной влажностью и текущим значением её влагосодержания

Из рисунка 3.3 массы, влагосодержание которых равно или немного больше наименьшей капиллярной влажности, имеют максимальное значение связности и в еще большей степени при наличии сыворотки как поверхностно-активного вещества (при наличии сыворотки (11%) линии на графике $C=15$ в $C=10$ связность выше). Математически эту взаимосвязь можно выразить формулами

$$W_{нкв} = \frac{C}{1+C} \cdot W_i; \quad W_i = \frac{1+C}{C} \cdot W_{нкв} \quad (3.2)$$

где C - связность материала

После извлечения образцов из пресс-формы (при достижении величины критического давления) производилось определение плотности образцов во влажном состоянии, а также весовым методом контролировалось влагосодержание.

Далее для сухого состояния, то есть плотности скелета ρ_T производились расчёты плотности образцов. Для этих же образцов определялись объёмные концентрации твердой (K_T), жидкой ($K_ж$) и газовой ($K_г$) фаз. После чего по полученным данным определялись соотношения между $(K_ж+K_г) / K_T=(1-\Pi)/K_T$.

Отношение линейных размеров диаметра пор к диаметру частиц при условии, что число частиц равно числу пор определяется:

$$\frac{d_n}{d} = \left(\frac{K_{ж} + K_{г}}{K_m} \right) \quad (3.3)$$

$$\frac{d_n}{d} = \left(\frac{K_{жг} + K_{г}}{K_m} \right)^{1/3} = \left(\frac{1 - K_m}{K_m} \right)^{1/3}, \quad (3.4)$$

где: d_n - диаметр пор;

d - диаметр частиц;

Π - пористость слоя.

Выражение (3.5) показывает взаимосвязь величины удельной поверхности единицы объёма и единицы массы:

$$S_v = S_m \rho_m, \text{ м}^2/\text{м}^3; \quad (3.5)$$

где: S_m - удельная поверхность единицы массы дисперсного материала, $\text{м}^2/\text{кг}$;

ρ_m - плотность твердой фазы образцов, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Учитывая величину удельной поверхности S_v и принимая во внимание соотношению фаз $(K_{ж} + K_{г})/K_{т}$ можно определить толщину газовой, а также газожидкостной прослойки $\delta_{пл}$ (мм) находящейся между частицами следующим образом:

В таблицах 3.3–3.8 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 говорится об объемной концентрации, при этом максимальна;

Таблица 3.3 – Свойства смеси № 1

W_i отн. ед	$P_{\text{пресс}}$, МПа	$P_{\text{впл}}$, кГ/М ³	$P_{\text{т}}$, кГ/М ³	$K_{\text{т}}$	$K_{\text{ж}}$	$K_{\text{г}}$	$\frac{K_{\text{ж}}+K_{\text{г}}}{K_{\text{т}}}$	$\left(\frac{K_{\text{ж}} + K_{\text{г}}}{K_{\text{т}}}\right)^{1/2}$	S_v , мм ² /мм ³	$\delta_{\text{нп}} \times 10^{-7}$, 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

Таблица 3.4 – Свойства смеси № 2

W_i отн. ед	$P_{\text{пресс}}$, МПа	$P_{\text{впл}}$, кГ/М ³	$P_{\text{т}}$, кГ/М ³	$K_{\text{т}}$	$K_{\text{ж}}$	$K_{\text{г}}$	$\frac{K_{\text{ж}}+K_{\text{г}}}{K_{\text{т}}}$	$\left(\frac{K_{\text{ж}} + K_{\text{г}}}{K_{\text{т}}}\right)^{1/3}$	S_v , мм ² /мм ³	$\delta_{\text{нп}} \times 10^{-7}$, м
0,176	15,42	2028	1725	0,690	0,304	0,006	0,449	0,766	596.8	7,52
0,191	9,31	1995	1675	0,670	0,320	0,010	0,492	0,789	579.5	8,49
0,207	5,29	1955	1620	0,648	0,335	0,017	0,543	0,816	560.5	9,68
0,223	3,31	1914	1565	0,626	0,349	0,025	0,597	0,842	541.5	11,02
0,239	2,63	1870	1510	0,604	0,361	0,035	0,656	0,869	522.5	12,55
0,255	2,08	1820	1450	0,580	0,370	0,050	0,724	0,898	501.7	14,43
0,274	1,55	1760	1382	0,553	0,379	0,068	0,808	0,931	478.2	16,89
0,305	1,32	1664	1275	0,510	0,388	0,102	0,961	0,987	441.1	21,78
0,319	1,03	1642	1245	0,498	0,397	0,105	1,008	1,002	430.7	23,40
0,331	0,73	1573	1182	0,473	0,392	0,135	1,114	1,036	409.0	27,23

Таблица 3.5 – Свойства смеси № 3

W_i отн. ед	$P_{\text{пресс}}, \text{МПа}$	$P_{\text{вкл}}, \text{кГ/М}^3$	$P_{\text{г}}, \text{кГ/М}^3$	$K_{\text{г}}$	$K_{\text{ж}}$	$K_{\text{г}}$	$\frac{K_{\text{ж}}+K_{\text{г}}}{K_{\text{г}}}$	$\left(\frac{K_{\text{ж}}+K_{\text{г}}}{K_{\text{м}}}\right)^{1/3}$	$S_{\text{в}}, \text{мм}^2/\text{мм}^3$	$\delta_{\text{ин}} \times 10^{-7}, \text{м}$
0,210	13,50	2029	1677	0,645	0,352	0,003	0,555	0,822	958.2	5,79
0,222	8,80	2011	1646	0,633	0,365	0,002	0,579	0,834	940.5	6,15
0,245	4,90	1984	1594	0,613	0,390	0,007	0,647	0,865	910.8	7,10
0,257	3,80	1953	1554	0,598	0,397	0,005	0,672	0,876	887.9	7,57
0,274	2,85	1911	1500	0,577	0,411	0,012	0,733	0,902	857.1	8,55
0,297	1,91	1854	1430	0,550	0,425	0,025	0,818	0,935	817.1	10,01
0,314	1,40	1827	1391	0,535	0,437	0,028	0,869	0,954	794.8	10,93
0,332	1,15	1,83	1339	0,515	0,444	0,031	0,922	0,973	765.1	12,05
0,346	0,95	1750	1300	0,500	0,450	0,050	1,000	1,000	742.8	13,46
0,366	0,75	1704	1248	0,480	0,457	0,063	1,083	1,027	713.1	15,18
0,380	0,68	1668	1209	0,465	0,459	0,076	1,150	1,047	691.4	16,63

Таблица 3.6 – Свойства смеси № 4

W_i отн. ед	$P_{\text{пресс}}, \text{МПа}$	$P_{\text{вкл}}, \text{кГ/М}^3$	$P_{\text{г}}, \text{кГ/М}^3$	$K_{\text{г}}$	$K_{\text{ж}}$	$K_{\text{г}}$	$\frac{K_{\text{ж}}+K_{\text{г}}}{K_{\text{г}}}$	$\left(\frac{K_{\text{ж}}+K_{\text{г}}}{K_{\text{м}}}\right)^{1/3}$	$S_{\text{в}}, \text{мм}^2/\text{мм}^3$	$\delta_{\text{ин}} \times 10^{-7}, \text{м}$
0,189	17,6	2022	1701	0,675	0,321	0,004	0,481	0,783	982.1	4,89
0,198	13,4	2007	1675	0,665	0,331	0,004	0,503	0,794	967.1	5,20
0,211	8,41	1983	1638	0,650	0,346	0,004	0,538	0,813	945.8	5,69
0,242	3,82	1923	1549	0,615	0,375	0,010	0,626	0,855	894.4	6,99
0,263	2,55	1876	1486	0,590	0,391	0,019	0,645	0,864	858.0	7,52
0,281	1,90	1839	1436	0,570	0,404	0,026	0,754	0,910	829.1	9,09
0,298	1,50	1799	1386	0,550	0,413	0,037	0,818	0,935	800.2	10,22
0,329	1,02	1725	1298	0,515	0,427	0,058	0,942	0,980	749.4	12,57
0,348	0,75	1663	1234	0,490	0,430	0,080	1,04	1,013	712.5	14,59

Таблица 3.7 – Свойства смеси № 5

W_i отн. ед	$P_{\text{пресс}}$, МПа	$P_{\text{вл}}$, кГ/М ³	$P_{\text{г}}$, кГ/М ³	$K_{\text{г}}$	$K_{\text{ж}}$	$K_{\text{р}}$	$\frac{K_{\text{ж}}+K_{\text{р}}}{K_{\text{г}}}$	$\left(\frac{K_{\text{ж}}+K_{\text{р}}}{K_{\text{м}}}\right)^{1/3}$	$S_{\text{в}}$, мм ² /мм ³	$\delta_{\text{пл}} \times 10^{-7}$, м
0,178	18,50	2047	1738	0,690	0,309	0,001	0,449	0,765	881.6	5,09
0,203	8,80	2003	1665	0,661	0,338	0,001	0,513	0,800	844.6	6,07
0,245	3,50	1919	1542	0,612	0,378	0,010	0,634	0,859	782.2	8,10
0,281	1,71	1835	1433	0,569	0,403	0,028	0,757	0,911	726.9	10,41
0,307	1,45	1775	1358	0,539	0,417	0,044	0,855	0,949	688.9	12,41
0,325	0,96	1726	1303	0,517	0,423	0,060	0,934	0,977	661.0	14,13
0,350	0,70	1652	1224	0,486	0,429	0,085	1,057	1,018	620.9	17,02
0,369	0,50	1607	1174	0,466	0,433	0,101	1,145	1,046	595.5	19,22

Таблица 3.8 – Свойства смеси № 6

W_i отн. ед	$P_{\text{пресс}}$, МПа	$P_{\text{вл}}$, кГ/М ³	$P_{\text{г}}$, кГ/М ³	$K_{\text{г}}$	$K_{\text{ж}}$	$K_{\text{р}}$	$\frac{K_{\text{ж}}+K_{\text{р}}}{K_{\text{г}}}$	$\left(\frac{K_{\text{ж}}+K_{\text{р}}}{K_{\text{м}}}\right)^{1/3}$	$S_{\text{в}}$, мм ² /мм ³	$\delta_{\text{пл}} \times 10^{-7}$, м
0,196	10,22	2077	1737	0,658	0,340	0,002	0,519	0,803	905,8	5, 73
0,212	6, 92	2047	1689	0,640	0,358	0,002	0,562	0,825	880,8	6, 38
0,233	4, 26	1965	1594	0,604	0,371	0,005	0,622	0,853	831,2	7, 48
0,251	3, 05	1961	1568	0,594	0,394	0,012	0,683	0,880	817,7	8, 35
0,272	2, 04	1923	1512	0,573	0,411	0,016	0,745	0,906	788,5	9, 45
0,311	1,08	1834	1399	0,530	0,435	0,035	0,886	0,960	729,5	12, 14
0,349	0,68	1735	1286	0,487	0,448	0,065	1,053	1,017	670,1	15, 71
0,365	0,51	1694	1241	0,470	0,453	0,077	1,127	1,040	647,2	17, 41

– – также, если капиллярная влажность увлажненной смеси минимальна, минимально и присутствие газообразной фазы, что обусловлено наличием развитой структуры гидратных оболочек, покрывающих поверхность частиц твердой фазы смеси, а также критическим давлением сжатия системы;

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

– слой прослойки, состоящей из газовой и жидкой фаз, достигает (5×10^{-7}) – $(3,3 \times 10^{-6})$ м, подобный порядок величин установлен теоретически Н. Б. Урьевым [266–268]. Минимальное значение капиллярной влажности удерживается частицей в размере около 1800 слоев молекулы воды при ее диаметре, составляющем 0,276 нм. Конечно, значение и порядок величины достаточно условны, хотя на основе этих данных можно прийти к некоторым заключениям о механизме и правилах удержания влаги дисперсными средами.

Характер изменения толщины слоя газожидкостной фазы исследуемых дисперсных сред различен. Это хорошо заметно для образцов №4 и №6, обладающих грубодисперсным зерновым составом

Повышение содержания увлажняющей среды в составе дисперсных систем приводит, как правило, к росту толщины слоя газожидкостной фазы и существенно снижает силу взаимного влияния отдельных частиц смеси. Такое уменьшение взаимодействия между частицами вызывает изменение механических свойств материала даже при незначительном изменении влагосодержания.

Если же, как в нашем случае, газо-жидкостная прослойка – коллоидная суспензия, в которой присутствует лактозно-белковая составляющая, то величина прослойки увеличивается (таблицы 3.3–3.8) примерно на (20–30)%.

Представленная на рисунке 3.4 графическая зависимость между коэффициентом «упаковки» частиц твердой фазы и содержанием влаги в смеси позволяет более наглядно выявить индивидуальность свойств дисперсных смесей

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

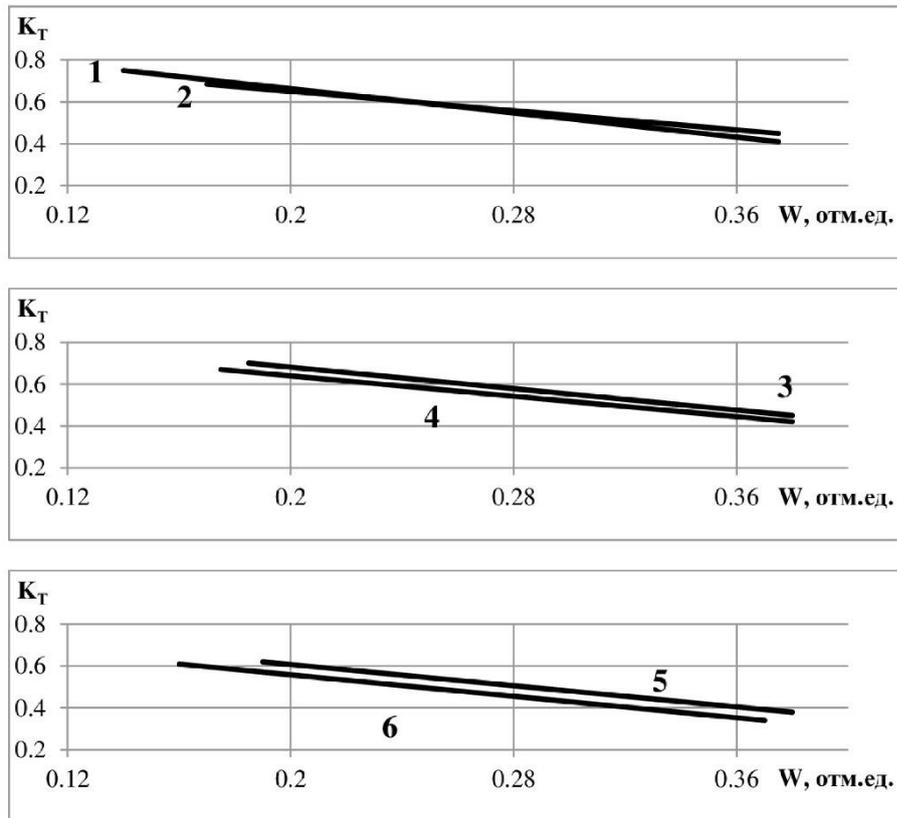


Рисунок 3.4 – Влияние влагосодержания смесей на процесс их уплотнения

- 1 – смесь № 6: $\Delta W/\Delta K_T = 0,374$; 2 - смесь № 2: $\Delta W/\Delta K_T = 0,936$;
 3 - смесь № 3: $\Delta W/\Delta K_T = 0,947$; 4 - смесь № 1: $\Delta W/\Delta K_T = 0,938$;
 5 - смесь № 5: $\Delta W/\Delta K_T = 0,924$; 6 - смесь № 6: $\Delta W/\Delta K_T = 0,785$.

Исследования показали, что концентрация твердой фазы, имеется в виду объемная концентрация, может реагировать по-разному на изменение влагосодержания дисперсной массы. Особенно следует отметить образцы №4 и №6, которые имеют большой разброс размера гранул и характеризуются незначительным присутствием частиц размером менее 0,5 мкм, что характерно, главным образом, для молочной сыворотки.

В качестве примера рассмотрим дисперсную систему, включающую грубодисперсную и тонкодисперсную составляющие. Тонкодисперсная фаза может быть образована, например, присутствием молочной сыворотки, сахарного порошка или плодово-ягодного шрота. Грубодисперсная система представлена частицами, имеющими размер 5..400 мкм. Каркас гранулы образован

грубодисперсной средой, а компоненты тонкодисперсных сред заполняют свободный объем каркаса.

В исследованиях (таблица 3.3) принимали участие дисперсные смеси с различным соотношением тонко- и грубодисперсной составляющих. Например, для образца смеси №3 характерно соотношение «грубодисперсная среда: тонкодисперсная среда» 2,1, для образцов №4, 5 и 6 это соотношение составляет 6,2, 2,67 и 6,3 соответственно. Таким образом, данный показатель является индивидуальной характеристикой каждого исследуемого образца. Отношение размеров частиц грубо- и тонкодисперсной сред варьируется от 10 до 100. Соотношение объема грубодисперсного каркаса и тонкой фракции наряду с температурой процесса обуславливает продолжительность технологических операций сушки и гранулирования. Тонкодисперсная среда склонна к образованию коллоидных растворов, поскольку в ее состав входят крахмал и частицы молочной сыворотки. Взаимодействуя с водой, эти вещества образуют поровое вещество гранулы. Это приводит в результате к образованию нового типа вещества, обладающего меньшей плотностью по сравнению с плотностью дисперсного материала. Поэтому объем твердого вещества в дисперсной системе увеличивается. Гидратация компонентов дисперсной системы, содержащих белковые соединения, приводит к тому, что они выступают в качестве основного влагоудерживающего компонента дисперсного материала. 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.

Особенно описанные явления ярко проявляются для образцов дисперсных масс, содержащих, главным образом, каркас из грубодисперсной фракции. После удаления влаги они способны воспринимать внешние усилия только за счет

каркаса, но не уплотняются при этом, так как основной пластифицирующий компонент, который отвечает за перераспределение частиц каркаса в объеме гранулы, отсутствует. Для образцов №4 и №6 характерно минимальное количество пластифицирующего вещества, поэтому для них в большей степени характерны эластичные деформации. Для образцов №1, №2, №3 и №5, наоборот, более характерны пластические деформации. Это в большей степени связано с тем, что в их составе достаточно присутствие жидкой фазы в поровом пространстве гранул. Для последних оптимальным является соотношение уплотнения твердой фазы, а также фильтрационного перемещения жидкой фазы. Причем влага в них имеет связанную форму, находясь в поровом пространстве частиц дисперсной массы. Таким образом, воздействие на формовочные свойства дисперсного материала и его склонность к уплотнению может быть оказано за счет изменения содержания поровой влаги гранулы и, соответственно, изменения ее коллоидно-химических свойств. Процесс уплотнения гранулы целесообразно отразить тройной диаграммой (рисунок 3.5), изображающей соотношение твердой, жидкой и газообразной фаз дисперсной системы.

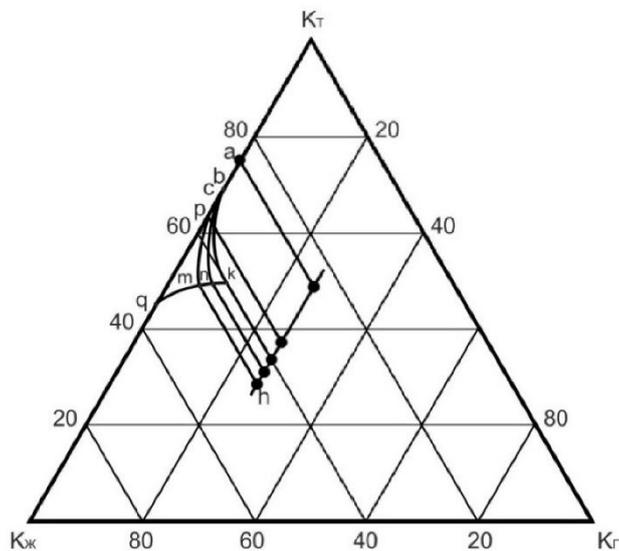


Рисунок 3.5 – Номограмма изменения соотношения фаз при уплотнении дисперсных масс:

1 – смесь № 6; 2 – смесь № 2; 3 – смесь № 1

Номограмма (рисунок 3.5) отражает процессы уплотнения дисперсных масс образцов №1 – (3), №2 – (2) и №6 – (1). Поведение остальных образцов может быть определено по участку номограммы, ограниченному зависимостями 1–3.

Зависимости отражают процесс уплотнения дисперсных материалов, для которых справедливо выражение $(K_{ж}+K_{г})/K_{т} \approx 1$. 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.

Рассмотрим динамику процесса уплотнения структуры дисперсной смеси на основе образца №6. При абсолютном содержании влаги в материале $W_a=0,335$ объемные концентрации газообразной, твердой и жидкой фаз соответственно составят $K_i=0,123$, $K_{ж}=0,397$ и $K_{т}=0,480$. Такое состояние дисперсной системы обозначено точкой К (рисунок 3.5). Изменение состава смеси в соответствии с данными таблицы 3.3 отображается на номограмме интервалом между точками (к-а). Наименьшее значение капиллярной влажности наблюдается в точке (а) и составляет $W_{нкв}=0,142$. При этом объемное содержание жидкой фазы $K_{ж}=0,26$. Т.е. участок (к-а) отображает такое соотношение фаз дисперсной системы, при котором плотность материала является критической, независимо от начального влагосодержания. При этом давление внешних деформаций также является критическим.

В момент подачи жидкой фазы в сухую смесь компонентов дисперсной системы порошка воздух механически захватывается, поэтому масса на начальном этапе представляет собой агрегированный материал, насыпная плотность которого варьируется от 1100 до 1200 кг/м³. Масса получается влажной и рыхлой. Газовая фаза содержится в составе такой дисперсной смеси в пределах $K_{г}=0,25-0,27$. Поэтому соотношение между фазами образца №6 отображено на номограмме точкой (f). Содержание жидкой фазы в этой точке составляет $K_{ж}=0,335$. При неизменном содержании жидкой фазы удаление газовой фазы из образца №6 в процессе его уплотнения отобразится линией (f-к), конечная точка которого соответствует критическому значению плотности образца. Если

количество жидкой фазы $K_{ж}=0,372$, то при уплотнении смеси изменению количественного соотношения фаз образца соответствует участок линии (e-p) до пересечения с линией (a-k).

Количество жидкой фазы $K_{ж}=0,26$ соответствует $W_{нкв}$. Изменение соотношения фаз при этом отображается на номограмме линией (d-a). Анализ характера изменения соотношения фаз дисперсной системы позволяет заключить, что максимальное уплотнение материала возможно при его наименьшей капиллярной влажности. Это обусловлено максимальной концентрацией твердой фазы в дисперсном материале, возникшей в результате его формования или прессования. Газовая фаза при этом практически отсутствует. Присутствие жидкой фазы минимально. Установленные закономерности характерны в той или иной степени для всех исследуемых образцов.

Установлено, что дисперсная масса, обладающая большей способностью к удерживанию влаги, при $(K_{ж}+K_{г})/K_{т} \approx 1$ способна связать большее количество жидкости. При этом кривая, отражающая динамику процесса уплотнения структуры дисперсной смеси, будет сдвинута в направлении более высоких значений $K_{ж}$ (рисунок 3.5). Твердая фаза содержится в таких смесях в минимально возможном количестве (точки k, n, m на кривых 1-3) $K_{т}=0,47-0,49$. Однако если при этом повысить содержание жидкости, то дисперсный материал достигнет состояния суспензии (пунктир k-n-m-q).

Исследование метода компрессионных испытаний позволило установить следующие положения. Рассмотренный метод во многом схож с методом капиллярной пропитки. Метод имеет ряд достоинств, так он прост и достаточно надежен. Он дает высокие результаты при оценке поведения трехфазных дисперсных систем. При этом закономерности поведения этих систем определяются физико-химическим составом входящих в смесь компонентов. Кроме того, закономерности определяются такими параметрами как размер частиц, их свойства и, что не мало важно гранулометрическим составом твердой фазы.

Важно отметить, что качество продукта зависит не только от свойств исходной дисперсной смеси. Оно во многом определяется технологическими и режимными параметрами таких технологических операций, как сушка, смешивание, окатывание.

3.2 Исследование процесса структурообразования многокомпонентных сывороткосодержащих гранулированных продуктов

Рассматривая процессы формирования сухих гранулированных продуктов, можно отметить существование нескольких гипотез их структурообразования из смеси растительного сырья и молочной сыворотки. Все предлагаемые ранее гипотезы основывались на достижениях того времени, уровня развития науки и технологий. При использовании таких гипотез применительно к теории структурообразования пищевых продуктов применялись, как правило, положения и термины из теории структурообразования смежных областей. При этом использовались постулаты таких наук, как физика твердого тела, физическая и коллоидная химия, химия гидрофобных материалов.

В основе таких заимствованных из других наук постулатов лежит положение о наличии поверхности раздела между твердой и жидкой фазами. Это вызывало необходимость введения в разрабатываемые модели исследования структурообразования гранул, не имеющих определённого физического смысла параметров. В качестве примера можно привести тот факт, что такие понятия, как микро- и макродефекты структуры твердого тела, имеющего, как правило, четко выраженную кристаллическую решётку, никак не могут быть тождественно применены к гомогенным системам, характерным для растительного сырья

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.

Растительное сырье в виду своих свойств по своей структуре относится к материалам с неоднородной структурой, в связи с чем для данного сырья не приемлема теория механики сплошных средств. Это связано с тем, что данная терминология применяется только для описания структуры чистых металлов или полупроводников и т.д.

При удалении влаги из растительного сырья в его структуре происходят изменения, связанные с образованием ассоциативных подструктур, теоретическое описание системы осложняется многообразием их форм взаимодействия. Структура растительного сырья также значительно подвержена влиянию режимных параметров процессов обработки – температуре, давлению и пр. В структуре растительных материалов наблюдается усадка, описать которую с использованием аппарата молекулярной физики невозможно. Поэтому наилучшим подходом к описанию и изучению поведения и структурообразования в дисперсных системах на основе растительного сырья является математический аппарат термодинамики. Он универсален, обладает хорошей прогностической способностью, не требует описания молекулярного механизма взаимодействия частиц в составе материала.

Наиболее популярной до последнего времени являлась капиллярная теория усадки полидисперсных коллоидных систем. Суть теории состоит в том, что на

границе раздела фаз, а именно жидкой и газовой, создается отрицательное давление, называемое Лапласово давление, при этом давление создается непосредственно в капиллярах дисперсного материала. Это давление приводит к уплотнению частиц материала. Однако понятие «поверхность раздела фаз» применительно к нескольким твердым компонентами материалов, находящихся в единой дисперсной смеси и другой фазой, например, жидкостью или газом, что было подтверждено большим количеством экспериментальных исследований.

Исследована плотность дисперсных систем на основе растительного сырья (рисунок 3.6). Основной метод исследования – использование пикнометрических жидкостей с размером молекул от 0,3 до 0,7 нм [26,137]. Исследованиям подвергались две предельные структуры. Одна из которых – дисперсия твердого тела и в качестве нее был принят кварцевый песок (1), другая – органический студень для нее был принят желатин (2). Исследована дисперсная среда на основе растительного сырья (3), состоящая из молочной сыворотки. Она занимает промежуточное положение между кварцевым песком и желатином, но по структуре она ближе к студням.

Рисунок 3.6 демонстрирует следующее. Кривая 1, отражающая зависимость плотности кварцевого песка, не обладающего внутренней пористостью, практически не меняет характера при использовании различных пикнометрических жидкостей. Материалы, склонные к набуханию, представлены в данном исследовании желатином, поведение которого описывает кривая 2. Плотность желатина, а также плотность дисперсной смеси на основе растительного сырья (кривая 3) возрастает при снижении размера молекул пикнометрической жидкости

Поэтому, рекомендуется в качестве истинной плотности твердого каркаса дисперсной системы, подвергшейся набуханию после взаимодействия с пикнометрической жидкостью, принимать ее значение в «нулевом» размере молекул пикнометрической жидкости. Значения плотности в опытах с одной пикнометрической жидкостью, в качестве которой может выступать ортоксиллол,

имеет меньшее значение, чем при использовании различных пикнометрических жидкостей.

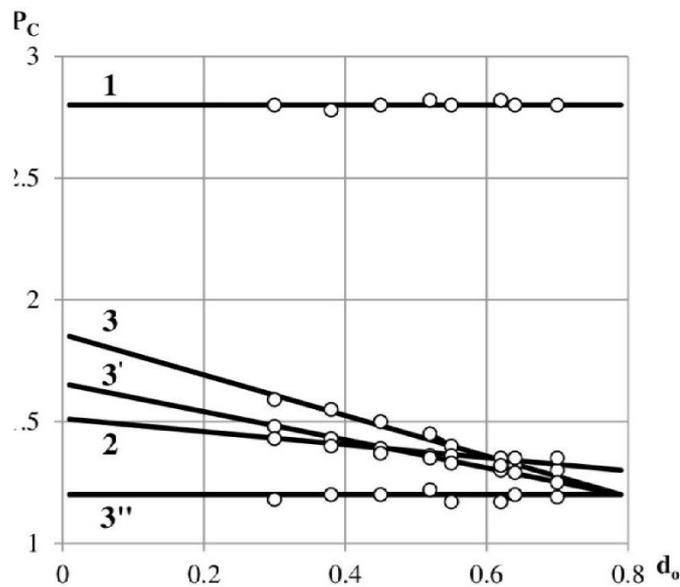


Рисунок 3.6 - Зависимость плотности ($\rho_c \cdot 10^3$, кг/м³) песка (1), желатина (2) и измельчённой смеси растительного сырья: при влагосодержании: $u=0$ (3), 0,116 (3'), 1,78 (3'') от размера молекул пикнометрической жидкости d_0 , н·м

Анализ графиков рисунка 3.6 позволяет утверждать то, что зависимость значений плотности суспензий, подвергшихся увлажнению и имеющих различные параметры влажности, от размеров молекул пикнометрической жидкости носит линейный характер практически во всех случаях. Значение плотности возрастает при увеличении размеров молекул. Это можно объяснить тем, что при увеличении размеров молекул увеличивается заполнение микрополостей пикнометрической жидкости.

Такая суспензия является примером дисперсной системы, предполагающей непрерывное взаимное пронизывание всех ее «фаз», непрерывное взаимное проникновение «фаз» друг в друга. Частицы твердого вещества растворены (распределены) в жидкой фазе. Такая дисперсная система носит название биконтинуальной [91], следовательно, понятие «поверхность твердой фазы» в данном случае не применимо.

Если рассматривать с этих позиций растительные смеси натурального природного происхождения, то можно сказать, что они состоят из иерархически

соподчиненных пространственных структур [137,297,319,355]. Отсюда возникает необходимость пересмотра основных положений существующих теорий структурообразования. Особенно это касается случая процессов формирования дисперсных смесей на основе растительного сырья и молочной сыворотки в условиях их обезвоживания. Современные теории должны строиться на принципах неравновесной термодинамики с учетом коллоидной химии гидрофильных материалов.

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

Процесс формирования гранул пищевого назначения может быть описан с позиций физико-химической механики дисперсных сред. Применение этого способа позволяет получить качественные модели в случае формирования изначально заданными свойствами и структурой дисперсных систем. Основой данного способа является положения, взятые из механики дисперсных систем, в большом количестве из коллоидной химии и молекулярной физики, а также физикохимии.

Дисперсные системы классифицируются на грубодисперсные и микрогетерогенные. Принцип, лежащий в основе такой классификации, основан на дисперсности среды в границе раздела фаз при проведении массо- и теплообменных процессов. При этом различаются критические диаметры частиц твердой фазы в различных жидких и газообразных средах. Так для системы с газообразной средой размеры твердой фазы составляют 10^{-4} м. А для системы с жидкой средой размеры твердой фазы составляют 10^{-5} м.

Дисперсные системы, имеют широкое распространение в пищевой промышленности. В данных системах дисперсионной средой чаще всего

выступает подготовленная вода. В дисперсных системах вода начинает взаимодействовать с твердыми частицами и при этом образуются определенные формы связи. Изучение этих форм связи воды и твердых частиц дисперсной системы является важной задачей.

Подготовка воды и проявление у нее определенных свойств оказывает прямое влияние на физико-химические и физико-механические свойства систем, в которых она является дисперсной средой. Также на свойства влияет содержание воды в системе. К одному из свойств воды, влияющих на ее поведение в дисперсной системе, относится полярность ее молекул и их водородные связи. Наличие этих водородных связей приводит к появлению аномальных свойств воды, к которым можно отнести теплоемкость воды, ее относительно высокое поверхностное натяжение и значимые адгезионные и диэлектрические свойства.

Процесс взаимодействия воды с твердыми частицами дисперсной среды состоит из нескольких последовательных стадий. На первой стадии проявляется процесс адсорбции паров воды поверхностью частиц. После чего на второй стадии наблюдается процесс конденсации паров на поверхности, который также проходит и в микрокапиллярах. Далее следует адгезия жидкости, а после смачивание и ее растекание по поверхности частицы.

Третья стадия процесса – адгезия обосновывается дисперсной составляющей молекулярных сил. В свою очередь ориентационная составляющая, величина которой определяется дипольным моментом молекул воды, определяет удержание большого количества воды поверхностью частицы.

Различные твердые тела по-разному взаимодействуют с водой. Способность их взаимодействия определяется химическим и минералогическим составом, также состоянием поверхности и т.п. А силы взаимодействия двух твердых частиц зависят от силы (энергии) взаимодействия молекул воды, находящихся в пограничном слое между твердыми частицами. Другими словами, толщина пограничного слоя воды между двумя твердыми частицами определяет силу сцепления этих частиц.

Кроме того, толщина прослойки воды между твердыми частицами влияет на реологические и структурно-механические свойства систем, состоящих из нескольких твердых компонентов – дисперсной системы. Это влечет за собой необходимость исследования и как результат классификацию всех возможных форм взаимодействия влаги с дисперсными средами.

Классификация может быть дана исходя из природы воздействующих на воду сил и агрегатное состояние влаги (Б.В. Дерягин [77]). Существует подход, когда классификация опирается на подвижность влаги в слое дисперсного материала, подвижность и агрегатное состояние воды, силы связи влаги с материалом (П.А. Ребиндер [248]).

Так А.К. Ларионов с соавторами на основе классификаций [237] предложил классифицировать виды влаги на группы – по агрегатному состоянию и подгруппы – по соотношению молекулярных F_m и гравитационных $F_{гр}$ сил (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Классификация видов влаги

Группы влаги по агрегатному состоянию	Подгруппы влаги, выделенные по соотношению сил	Формы связи влаги с материалом (по П.А. Ребиндеру)
Вода в парообразном состоянии	–	–
Вода в жидком состоянии	Вода связанная ($f_m > f_{гр}$)	Физико–химическая
	Прочно связанная	
	Рыхло связанная	
	Капиллярная вода ($F_m \geq F_{гр}$)	Физико–химическая + физико–механическая
	Гравитационная или свободная вода ($F_m < F_{гр}$)	Физико–механическая
Вода в твёрдом состоянии	Вода, химически связанная и кристаллизационная	Химическая
	Вода в состоянии льда	

Классификация, представленная в таблице 3.9 для форм связи воды, как и многие классификации, является условной и вполне может быть использована наряду с классификацией, изложенной в трудах П.А. Ребиндера.

Рассмотрим более подробно некоторые из видов связей воды:

Химически связанная влага по агрегатному состоянию относится к воде в твердом состоянии, а именно в кристаллической структуре. Прочность химической связи удерживающей равна 461,3 кДж/моль. Данное усилие справедливо для (О-Н) связей. Значение энергии показывает, какое ее количество необходимо приложить, чтобы разорвать данные связи. Данные химические связи действуют на расстоянии в пределах от 0,1 до 0,2 нм.

Наряду с химически связанной влагой существует и физико-химическая влага, которая по агрегатному состоянию относится к воде в жидком состоянии. К данному типу связей относятся прочно и рыхло связанные влаги.

При образовании прочно связанной влаги наблюдаются молекулы, которые находятся на поверхности твердого вещества и удерживаются на нем благодаря водородной связи. Данная связь, которая позволяет удерживаться прочно связанной влагой, 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.

Рыхло связанная влага удерживается за счет вторичной ориентации дипольных молекул вследствие дипольного взаимодействия с молекулами прочно связанной влаги.

Для определения количества связанной влаги в дисперсном материале использую условную величину (максимальная гигроскопичность влаги ($W_{\text{мг}}$)). В работах А.А. Роде [355] на основе анализа большого объема экспериментальных данных, приводятся результаты исследований гигроскопичности влаги в почвах.

Зависимости могут быть аппроксимированы аналитически как:

$$W_{\text{мг}}=0,303D, \% \quad (3.7)$$

$$Q=2,093W_{\text{мг}}, \text{ Дж/г}, \quad (3.8)$$

где $W_{\text{мг}}$ - максимальная гигроскопическая влага, %;

D - дисперсность или процентное содержание частиц с размером менее 0,001 мм;

Q - теплота смачивания материала, Дж/г.

Удельная поверхность дисперсного материала определяется с учетом теплоты смачивания по формуле Ф.Д. Овчаренко и А.В. Думанского:

$$S_{\text{м}}=86206Q, \text{ см}^2/\text{г} \quad (3.9)$$

Смачивание дисперсной среды мономолекулярным слоем воды фиксируется на поверхности частиц твердой фазы за счет силового поля. Тепловое движение молекул воды в слое прекращается. Энергия теплового движения переходит в теплоту смачивания. Также контакт твердой фазы с жидкой приводит к снижению сил поверхностного натяжения последней вследствие уменьшения площади смачивания. Данный фактор также вызывает переход удельной поверхностной энергии в теплоту смачивания. Удельная поверхность дисперсного материала и теплота смачивания могут быть использованы для определения количества прочносвязанной воды в мономолекулярном слое. Аналитически эта связь с учетом (3.7) и (3.8) может быть представлена выражением:

$$A=4,98 \times 10^{-3} \times W_{\text{мг}}=1,509 \times 10^{-3} \times D, \text{ г/г} \quad (3.10)$$

Отсюда следует, что количество прочносвязанной воды напрямую определяется максимальной гигроскопической влагой дисперсной среды. Иначе оно пропорционально процентному содержанию частиц, размер которых менее 1 мкм. Можно сказать, что дисперсность среды служит главным фактором, обуславливающим количество связанной влаги в материале.

Адсорбционные явления, возникающие в дисперсных средах, могут быть рассмотрены с позиций сил молекулярного и энергетического взаимодействия. Последние возникают вследствие того, что поверхность частиц имеет заряд,

характеризующийся количеством и полярностью, а также в силу дипольного строения молекул воды и присутствием в ней ионов различных химических веществ. Наряду с дисперсностью среды на количество связанной влаги влияние оказывает минеральный состав твердой фазы, ее обманная поглотительная емкость и ряд других факторов, характеризующих ионы растворенных в ней в частности, их свойства, концентрация, величина заряда [26,29,73,91,238] и пр.

ПАВ и коллоидные вещества напрямую влияют на структуру диффузионной оболочки и гидрогелевых прослоек, а именно на их толщину и плотность. На границе раздела трех фаз (жидкой, твердой и газообразной) возникают капиллярные силы, которые позволяют удерживать влагу. Поскольку, как и любая система, дисперсная среда стремится к равновесию, следовательно, дисперсная система понижает поверхностную энергию. В результате этого жидкость, которая находится на поверхности дисперсной среды принимает вогнутую форму. Данные жидкие мостики как раз и позволяют образовать единую структуру и сцепить вместе твердую, жидкую и газообразную фазы.

Различают внутрикапиллярную и капиллярно-стыковую влагу дисперсных систем. При этом внутрикапиллярная влага находится либо в микрокапиллярах, либо макрокапиллярах с размерами диаметров соответственно не более 20^{-7} м и не менее 20^{-7} м. Данные размеры капилляров для удержания влаги были определены и изложены в трудах профессора Лыкова. Размеры микро и макрокапилляров напрямую зависят от средней длины свободного пробега молекул воды. Поэтому наиболее часто прочносвязанная влага локализуется на поверхности частиц твердой фазы и в микрокапилляры. Тогда как в макрокапиллярах и в промежутках, образованных частицами твердой фазы, возможно появление рыхлосвязанной влаги. Влага, содержащаяся в микро и макрокапиллярах равна гигроскопической.

Капиллярно-стыковая влага в отличии от капиллярной наблюдается на границе раздела твердой фазы, в местах соприкосновения частиц дисперсной среды. Образующиеся жидкие мостики в местах соприкосновения твердых частиц и капиллярно-стыковой влаги имеют форму двояковогнутой линзы. Такая форма

характерна из-за сферической формы самих твердых частиц дисперсной среды. Боковая часть линзы имеет выпукло-вогнутую форму из-за сил поверхностного натяжения связующего раствора.

Водные манжеты (капиллярно-стыковая влага вокруг большого скопления частиц твердой фазы) могут входить или не входить в контакт друг с другом. При взаимном соприкосновении жидких сред происходит передача гидростатического давления, что приводит к движению связующего раствора, за счет приобретения свойств сплошности среды. Рассмотренная классификация состояний влаги в дисперсной системе может быть использована в научно-исследовательской работе, наряду с классификацией П.А. Ребиндера.

Капиллярно-стыковая влага на поверхности раздела фаз образуя сплошную среду создает гидростатическое давление жидкой среды. При этом точку в которой происходит передача давления называют наименьшей капиллярной влажностью (НКВ). Влага в дисперсных системах также может быть связанной или адсорбционной. Данная влага не может перемещаться за счет сил гидростатического давления, что существенно увеличивает сложность ее удаление.

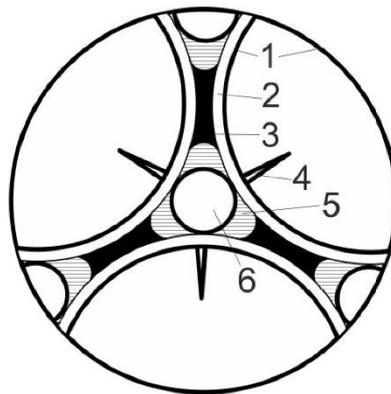


Рисунок 3.7 - Схема удержания различных форм влаги

поверхностью твердых частиц:

- 1 – твердая частица; 2 – пленки прочно- и рыхло- связанной воды; 3 – влага макрокапилляров; 4 – влага микрокапилляров; 5 – капиллярно-стыковая влага; 6 – газовые поры.

Для раскрытия сущности процесса приобретения влагой свойства сплошности и способности передавать гидростатическое давление рассмотрим схемы (рисунки 3.7 и 3.8).

Рисунок 3.7 иллюстрирует идеальный принцип удержания влаги на поверхности частицы твердой фазы дисперсной системы. Причем влага может быть представлена разными формами. Например, связанная влага удерживается на поверхности твердой частицы за счет микропор (микротрещин). Повышение степени увлажненности твердой частицы вызовет концентрирование влаги в макрокапиллярах. В данном случае особую роль играет максимальное значение гигроскопической влажности $W_{\text{мг}}$. Определять ее значение необходимо при относительной влажности окружающего воздуха от 0,95 до 0,99. При этом максимальное значение гигроскопической влажности зависит от кристаллического строения частиц твердой фазы дисперсной системы и дисперсность самого материала.

Повышение степени увлажненности дисперсной массы ($W > W_{\text{мг}}$) основным местом концентрирования влаги будет являться свободный объем макрокапилляров. Предельное влагосодержание трехфазной дисперсной среды выражается в образовании сетки капиллярно-стыковых манжет, непрерывно занимающей объем среды. При этом капиллярная влажность будет минимальной. Твердая фаза в этом случае займет максимально возможный объем, а ее высокая концентрация, обозначаемая через коэффициент $K_{\text{т}}$, будет обусловлена наименьшим расстоянием между частицами фазы.

При наименьшей капиллярной влажности влага не способна перемещаться в объеме дисперсной среды, аналогично максимально возможной гигроскопической влаги. Влага также не передает гидростатическое давление. Такое состояние влаги предполагает ее удаление только в процессе нагрева и парообразования. Перемещение влаги в объеме дисперсной среды возможно только для случая, когда $W > W_{\text{нкв}}$. Также она способна в данном случае передать гидростатическое давление. Верхний предел гигроскопической влажности $W_{\text{мг}}$ является некоторой границей, олицетворяющей переход превалирующего значения величины энергии

удерживающей влагу от сорбционных к капиллярным силам. Точка перехода наименьшей капиллярной влажности является условным значением, при котором также превалирующее значение энергии удерживающей влагу переходит от капиллярно-неподвижной и капиллярно-подвижной. На рисунке 3.8 представлено графическое изображение групп и форм связей жидкости и дисперсного материала.

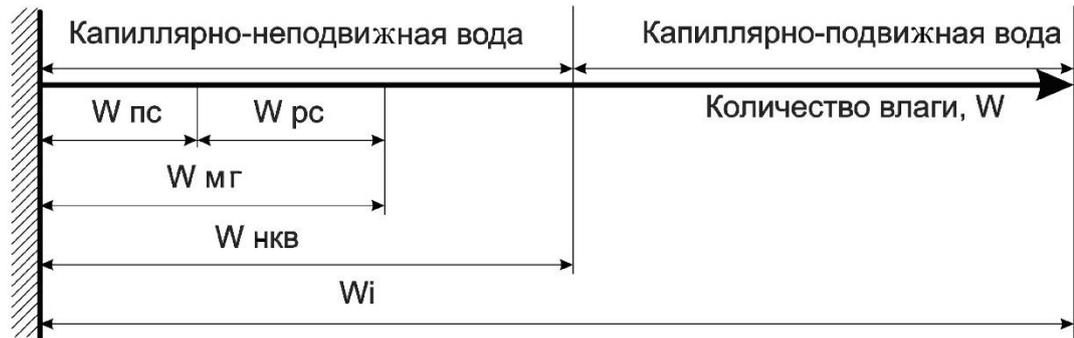


Рисунок 3.8 - Ориентировочное соотношение форм воды, удерживаемых слоем частиц дисперсного материала

В случае влажности $W > W_{нкв}$ толщина прослойки жидкости между частицами дисперсной системы возрастает. В результате этого наблюдается превалирующее значение капиллярных сил.

Уравнение Лапласа имеет следующий вид ($F_k = \sigma(1/r_1 - 1/r_2)$). Данное уравнение показывает зависимость между значениями капиллярного давления F_k , которое возникает внутри двояковогнутой манжеты, образующейся на стыке дисперсной среды и связующего раствора (рисунок 3.7). Радиусы кривизны двояковогнутой манжеты имеют соответственно значения r_1 и r_2 . При достижении максимальной капиллярной влажности происходит снижение капиллярных сил [22,25]. Данное условие возможно при $K_T = K_J = 0,5$; $K_T/K_J = 1$. Т.е. в данном случае объемные значения содержания твердой и жидкой фаз в системе являются идентичными. При W большей наименьшей капиллярной влажности наблюдается снижение механических свойств дисперсной среды. Поэтому с целью получения продукта заданных показателей структурно механических свойств необходимо использовать $W_{нкв}$ как предельное значение и относительно

него можно выбирать технологию производства и параметры проведения процессов.

Дисперсная среда обладает свойствами как жидкости, так и твердого тела согласно [23,229]. При этом структура дисперсной системы может стремиться к ним в зависимости от структурного каркаса самой дисперсной системы. Дисперсная система может характеризоваться свойствами связи между дисперсной системой и дисперсионной средой (о способах и свойствах связей говорилось ранее) [23,137,229,355,295]. На данный момент применяется два способа определения механических свойств вновь образованной системы.

Для первого способа характерно определение энергии взаимодействия частиц твердой фазы за счет дисперсионной среды, находящейся между ними (манжета). Данными исследованиями занимался профессор Н.Б. Урьев, который смог систематизировать результаты исследований, направленных на изучение структурообразования в дисперсных системах с введением дисперсионной среды [266-268]. На основе совокупного анализа данных установлено, что с увеличением концентрации дисперсной фазы происходит плавное изменение свойств системы. При определенных концентрациях близких к предельным, наблюдались значительные изменения структуры системы, при этом преобладающим значением являлась концентрация твердой фазы в дисперсионной системе. Отмечено, что ход зависимости свойств от концентрации твердой фазы при повышении критической концентрации резко изменяется. Наиболее надежным и простым способом оценки числа контактов между частицами является номограмма (рисунок 3.9), которая позволяет определить удельное количество контактов на единицу площади вещества с учетом степени заполнения объема твердой фазой и размер ее частиц.

Аналогичным образом расчет осуществляют А.Ф. Зимон и Е.И. Андрианов [93]. При этом вторичные параметры дисперсионных систем могут быть рассчитаны в соответствии с методикой А.Ф. Полака с соавторов [230].

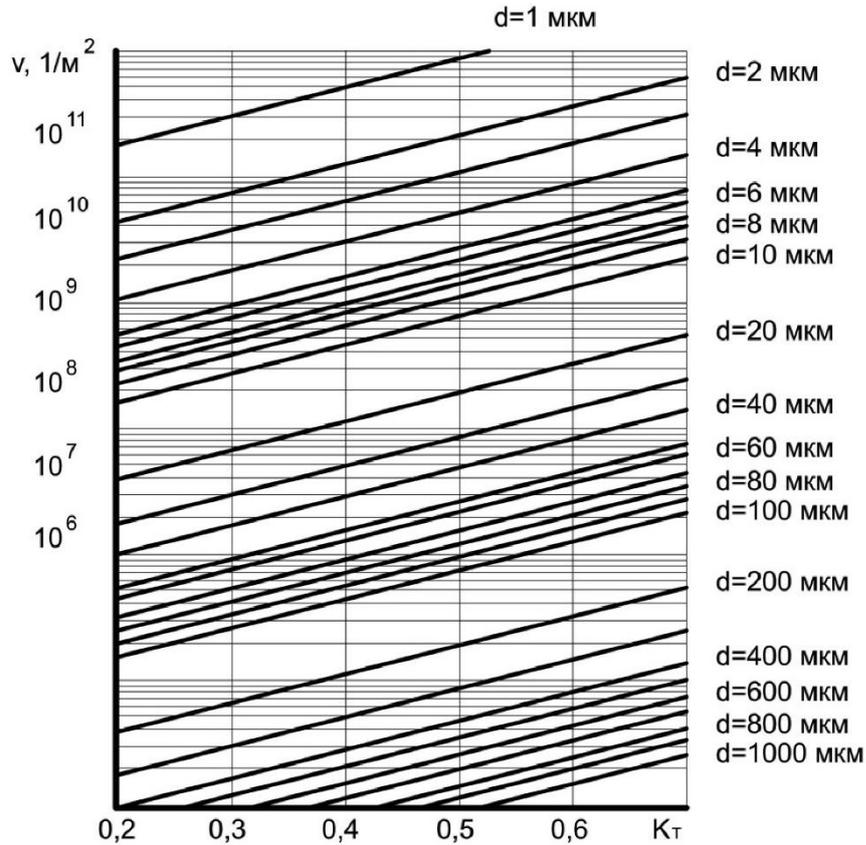


Рисунок 3.9 - Номограмма, характеризующая зависимость числа контактов между частицами от их размера и объёмной концентрации твёрдой фазы:

v – число контактов; d – размер частиц; K_T – степень заполнения объёма

Второй способ оценки механических свойств дисперсных материалов, характеризующихся высокой концентрацией вещества, отличается тем, что учитывает основные структурные характеристики пористых сред и действующих капиллярно-молекулярных сил. В частности, Ньюит [356] использует аналитическую зависимость, позволяющую определить максимальную прочность гранулы, вызванную капиллярным состоянием воды:

$$\sigma_r = 2,8 \times \frac{1 - \Pi}{\Pi} \times \frac{\sigma}{r}, \quad (3.11)$$

где: σ_r - прочность гранулы, г/м²;

Π - пористость гранул, отн. ед;

2,8 - коэффициент пропорциональности, учитывающий зависимость относительной прочности гранулы от степени насыщения пор влагой;

σ - поверхностное натяжение поровой жидкости, дин/м;

r - средний радиус частиц, мкм.

Расчет молекулярных сил взаимодействия частиц через слой жидкой фазы в составе дисперсной массы, предложенный В.И. Коротичем [137], основан на замене фиксированного коэффициента 0,075 коэффициентом, отражающим совокупность гидрофильных свойств массы, особенностей формы частиц материала и характера их укладки.

Формула прочности влажного материала, полученная Румпфом [355], имеет вид:

$$\sigma_p = \frac{(1 - \Pi) \times K}{\pi} \times \frac{F_c}{d^2}, \quad (3.12)$$

где : σ_p - прочность влажного материала при разрыве, Па;

F_c - сила взаимодействия между частицами, Н;

d - диаметр гранулы, м;

K - координационное число.

Соотношение грубодисперсного каркаса и порового пространства гранулы может быть отражено структурным параметром. Напряженность электромолекулярного силового поля в контактной зоне, в свою очередь, характеризует энергетический параметр.

Наиболее полное представление о механических свойствах увлажненных дисперсных масс может быть получено на основе комплексного показателя.

Однако наибольший вес имеет концентрационный (структурный) показатель прочности:

$$(1 - \Pi) / \Pi = K_T / \Pi = K_T / (K_G + K_J), \quad (3.13)$$

где: K_T / Π - соотношение фаз в системе (Т+Г);

$K_T / (K_G + K_J)$ - соотношение фаз в системе (Т+Г+Ж).

Π – пористость.

Гранулометрический состав гранулы является основным фактором, определяющим пористость дисперсных сред. Также он определяет величину объемной концентрации твердой фазы дисперсного материала. Таким образом, оба эти свойства не зависят от дисперсности частиц. Соотношение K_T/Π 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 $K_T/K_{ж}$ в качестве основного показателя структурной прочности обеспечит более высокую точность результатов оценки механических характеристик увлажненных сред.

Номограмма (рисунок 3.9), кроме того, демонстрирует функциональную зависимость количества контактов частиц дисперсного материала от их размеров и содержания в объеме. Количество возможных контактов частиц дисперсного материала находится в обратной пропорциональной зависимости относительно квадрата диаметра частиц:

$$\nu = \frac{1}{m^2 d^2}, \quad (3.14)$$

где: ν - число контактов;

d – диаметр частиц.

Таким образом, можно заключить, что величина $(1/d^2)$ обуславливает количество контактов частиц увлажненного дисперсного материала и определяет его структурную прочность. В соответствии с формулой (3.14) прочность влажных дисперсных материалов до или после обработки обуславливается в значительной мере объемной концентрацией твердой фазы K_T , в частности, или величиной соотношения концентраций твердой и газообразной фаз K_T/K_g в общем.

Однако рассмотренная номограмма недостаточно точно отражает зависимость количества контактов частиц дисперсных материалов от их размера в реальных дисперсных системах, поскольку гранулометрический состав на практике отличается сложностью и разнообразием. Т.е. оценить процесс

формирования гранулы реальной дисперсной системы достаточно сложно. С этой позиции для определения количества возможных контактов частиц необходимо предварительно определить их средний размер. Также необходимо учитывать концентрацию частиц дисперсной системы.

Процесс пластического формования 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 формования дисперсных масс.

Управление процессом формования осуществляется посредством воздействия на соотношение жидкой и твердой фаз дисперсной системы, однородность этих фаз, а также на объемную концентрацию твердой фазы.

Рассмотрим основные способы управления процессом формования дисперсных масс.

1. Управление за счет изменения соотношения твердой и жидкой фаз и объемной концентрации твердой фазы. Эмпирически установлено максимальное содержание твердой фазы $K_T = 0,70-0,75$ (таблицы 3.3–3.8). Соответственно, объемное содержание влаги в дисперсной массе, удерживаемой на капиллярном уровне, составляет $K_{ж} = 0,28-0,30$. Значение $W_{нкв}$ обуславливает связность компонентов дисперсных масс, т.е. отражает совокупность максимальных сил внутреннего сцепления, максимальной механической прочности и предельной однородности их структуры и свойств. Предельные значения указанных характеристик определяются отсутствием капиллярно-подвижной влаги, что позволяет сохранять дисперсным массам их свойства в случае внешних механических воздействий. Поэтому указанные диапазоны влажности и содержания твердой фазы являются наиболее приемлемыми с позиции оптимальности процесса пластического, в частности, экструзионного формования.

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 $W_{нкв}$ этот показатель не поднимется выше 0,5–0,8 мкм. Чем меньше интервал значений толщины слоя, 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. Очевидно, что в таком случае наблюдается фильтрационное перемещение влаги вследствие невысокой влагоудерживающей способности каркаса. Это приводит к ухудшению характеристик дисперсного материала, а именно – снижению механической прочности и плотности, однородности распределения влаги в объеме материала. Однако снизить скорость фильтрационного перемещения жидкой фазы в объеме дисперсной массы возможно за счет изменения состава твердой фазы материала и, в частности, воздействием на его грубодисперсный каркас. Дисперсный материал склонен удерживать влагу, если в его составе имеются частицы размером не более 5 мкм, лучше не более 1 мкм. Причем их концентрация должна превышать 15–20%.

Высокая степень водоудержания характерна для дисперсных масс, удельная поверхность которых превышает $500 \text{ м}^2/\text{кг}$. При этом содержание капиллярно-неподвижной влаги в них ($W_{нкв}$) должно превысить 16%. Воздействие на зерновой состав каркаса и поровое вещество с целью оптимизации их соотношения, в свою очередь, способствует повышению степени однородности дисперсного материала, а также благоприятно сказывается на его формовочных свойствах.

Известен ряд зарубежных исследований, посвященных изучению вопросов перераспределения жидкой фазы дисперсной массы под влиянием внешних нагрузок. В частности, Д. Рид [357] исследовал подверженность структуры материала и его предела текучести внешней уплотняющей нагрузке в условиях

пластических деформаций. Результаты исследований содержат заключение о том, что предел текучести в процессе пластического формования дисперсной массы снижался, хотя фильтрационное перемещение жидкой фазы было незначительным.

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. Использованием 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.

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.

Из практики известен еще один способ управления процессом пластического формования дисперсных масс. Он применим в случае недостаточной мощности формующих аппаратов, не способных обеспечить процесс формования при наименьшей капиллярной влажности, но способных формовать при нормальной влажности. При этом для повышения однородности структура формовочной массы должна быть предельно разрушена. Продукт на

основе такой дисперсной массы не имеет дефектов, характерных для масс с неразрушенной структурой.

3.3 Особенности структурообразования гранул, содержащих сыворотку

При гранулировании молочной сыворотки с применением метода окатывания необходимо учесть ряд особенностей, влияющих на динамику процесса и его результат. Как правило, дисперсную систему рассматривают как совокупность грубодисперсной пассивной составляющей, за счет которой формируется каркас будущей гранулы, и тонкодисперсной среды в виде коллоидных, реже полукolloидных фракций, образующей жидкую фазу гранулы, находящуюся, главным образом, в виде порово-стыкового вещества [18,22,92,127,136,231,266,320,356]. В процессе формирования и уплотнения гранулы газовая фаза частично выводится из продукта, частично присутствует в готовой грануле в растворенном виде в жидкой фазе, т.е. так называемом заземленном состоянии.

Главная особенность стадии уплотнения гранулы – высокая степень свободы объемной деформации. Поэтому гранулирование протекает при пластичной деформации, сохраняющей связность гранулы.

В случае, когда дисперсная система не обладает достаточной пластичностью сдвига для проведения гранулирования методом окатывания, необходимо внесение коагулирующих добавок, как правило, в небольшом количестве, позволяющих повысить коагулируемость жидкой фазы – поровой суспензии. Однако в случае концентрированной молочной сыворотки внесение подобных добавок не требуется, поскольку они присутствуют в составе сыворотки изначально. Поэтому концентрат молочной сыворотки обладает хорошей комкуемостью, что необходимо при ее гранулировании методом окатывания.

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.

При использовании концентрата молочной сыворотки с высоким содержанием сухих веществ динамика процесса гранулирования меняется, главным образом, изменение претерпевает стадия зародышеобразования. Изменения отмечаются в структуре гранулы готового продукта. Содержание сухого вещества выше 50% и, тем более, выше 70% изменяет процесс гранулирования следующим образом. Концентрат молочной сыворотки, подаваемый в объем аппарата через форсунки, распадается на отдельные капли. Начальная температура капель соответствует температуре пастеризации концентрата. При попадании в объем аппарата температура капель снижается, что способствует их высыханию еще до соприкосновения с порошком молочной сыворотки, находящимся в аппарате. Вязкость и липкость капель возрастает в значительной степени, что способствует налипанию на них частиц сухого порошка, который, в свою очередь, пропитывается влагой, содержащейся в концентрате, лишая тем самым зародыш гранулы необходимой влаги. Этот процесс обусловлен силами пластической деформации и капиллярного взаимодействия. Влага перемещается из сердцевины гранулы к ее поверхности, что вновь способствует налипанию частиц сухого порошка молочной сыворотки. При этом размеры гранулы увеличиваются. Непрерывный подвод влаги в объем аппарата вызовет формирование гранулы хаотичной формы и большого размера – порядка 10...30 мм. С целью обеспечения прерывистой подачи жидкой фазы конструкция гранулятора модернизирована путем введения активатора,

вращающиеся лопасти которого оказывают разрушительное воздействие на гранулы. Тем самым спонтанность процесса образования агломератов исключается. Присутствие активатора в составе гранулятора необходимо при гранулировании творожной сыворотки, что обусловлено ее высокой кислотностью.

Степень концентрирования молочной сыворотки оказывает влияние на скорость процесса получения гранул. Однако в интервале от 40 до 70% содержания сухого вещества характер этого влияния незначителен, поскольку процесс зародышеобразования и формирования объема гранулы управляется режимом работы лопастного активатора, что благоприятно сказывается на стабильности процесса гранулирования в целом.

Сила сцепления частиц влажной среды в составе материала, подвергаемого гранулированию, зависит от многих факторов, и, в свою очередь, определяет скорость роста гранулы продукта и ее прочность. Совокупность факторов, оказывающих такое влияние, принято называть комкуемостью, которая представляет собой способность материала к гранулированию методом окатывания. Формы присутствия влаги в структуре гранулы различны. Качественная и количественная оценка энергетически и структурно различных форм возможна с позиции свойств дисперсий, в составе которых влага присутствует. Прочность гранулы продукта определяется количеством контактов, приходящихся на единицу объема гранулы, и прочностью единичного контакта. В свою очередь, количество возможных контактов определяется формой и размером частиц дисперсного материала.

Как известно, каркас зерна образован кристаллами лактозы, которые имеют достаточно плоские грани, поэтому контакт кристаллов осуществляется по плоскостям. Кристалл лактозы – моноклинная сингония с аксиальным видом симметрии. При этом он может иметь до шестнадцати поверхностей различной геометрической формы – прямоугольник, параллелепипед, ромб, трапеция. Поэтому вероятность образования контактов типа «плоскость – плоскость» очень высока (рисунок 3.10).

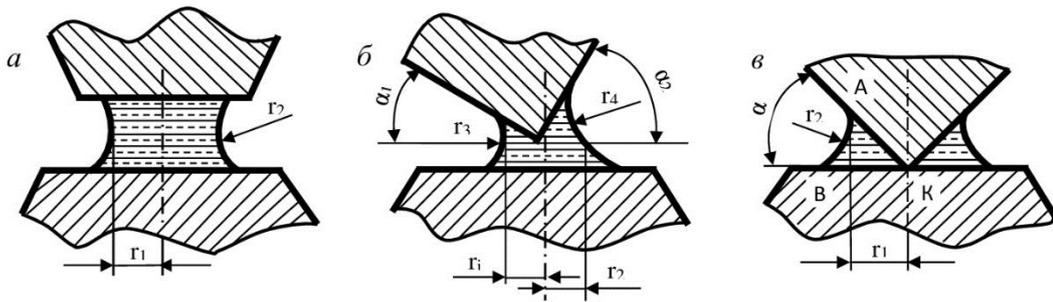


Рисунок 3.10 – Варианты контакта кристаллов лактозы

Сушка полидисперсной смеси вызывает образование прочной структуры монолитного состава. При этом возникающие единичные контакты кристаллов лактозы могут занимать достаточно большую поверхность, поэтому сила их сцепления тоже может быть значительной. Для кристаллической плоскости, как правило, не характерен развитый рельеф, их поверхность практически идеальна. Поэтому велика вероятность возникновения молекулярных сил взаимодействия кристаллов при их сближении. Отсюда и возникают две основные формы их взаимодействия: плоскость – плоскость либо плоскость – конус.

Радиус кривизны жидкой фазы, выполняющей функции стыковки в манжете, а также величины капиллярного давления при разных вариантах размеров кристаллов и содержании жидкой фазы в местах их контактов могут быть получены в результате геометрического построения при условии, что смачиваемость поверхности лактозы абсолютна, т.е. $\cos\theta = 1$.

Из $\triangle ABK$ (рисунок 3.10), следует: $BK = \frac{AB}{\operatorname{tg}\alpha}$; $AB \approx 2r_2$; $r_1 = \frac{2r_2}{\operatorname{tg}\alpha}$; $r_2 = r_1 \frac{\operatorname{tg}\alpha}{2}$

Рассмотрим силу сцепления для случая поверхность – конус.:

Капиллярное давление $P_K = \frac{\delta}{r_1} \left(\frac{2}{\operatorname{tg}\alpha} - 1 \right)$. Сила сцепления $F_K = \pi \delta r_1 \left(\frac{2}{\operatorname{tg}\alpha} + 1 \right)$.

Сила сцепления двух плоскостей обусловлена поверхностным натяжением жидкости, ее количеством, а также площадью контакта. Определить силу сцепления посредством математических вычислений невозможно, поскольку неизвестны радиусы r_1 и r_2 . Также трудность расчетов обусловлена наличием гелеобразных сывороточных белков в месте соприкосновения кристаллов лактозы

друг с другом. Гелеобразные белковые соединения в значительной степени характеризуются адгезионными свойствами, проявляющимися по отношению к твердым фазам [9,21,31,83,229,273,370]. Это явление обуславливает использование белковых соединений в качестве основы для клеящихся веществ. При высыхании они образуют высокопрочные клеевые пленки, что объясняется переходом структуры белковых веществ в конденсационно-кристаллизационное состояние. При этом небольшие кристаллы являются наполнителями раствора, заполняющего пространство между кристаллами лактозы.

Гранулирование нативной молочной сыворотки характеризуется низкой эффективностью [21], так как перед гранулированием необходимо молочную сыворотку высушить, что сопровождается формированием слоя продукта на рабочих поверхностях сушильного оборудования и снижает интенсивность процесса в целом. Также сьем пленки высушенной молочной сыворотки с рабочей поверхности сушильного оборудования затруднителен и трудоемок. Энергозатраты процесса сушки молочной сыворотки значительны.

Процесс гранулирования может быть интенсифицирован и доведен до оптимального. Основным способом интенсификации заключается во внедрении в рецептуру производства сухих гранулированных продуктов на основе молочной сыворотки муки из плодово-ягодного сырья. Такая мука производится на основе шрота ягодного или плодового сырья, оставшегося после извлечения компонентов, используемых при производстве алкогольных и безалкогольных напитков. 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.

Присутствие различного рода наполнителей, количество которых эквивалентно содержанию сухого вещества гранулируемой смеси, предполагает их предварительное увлажнение и смешивание с основными продуктами, что в целом позволяет интенсифицировать процесс гранулирования. При этом распыление влаги должно носить непрерывный характер.

3.4 Исследование структурно-механических свойств гранулированной сыворотки и сывороткосодержащих композиций

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 и определяет стабильность процесса гранулирования.

Процесс гранулирования очень сложен для аналитического описания. Даже зная структурно-механические свойства каждого компонента смеси, трудно составить прогноз прочностных свойств получаемых гранул. Каждый этап процесса гранулирования – от зарождения рыхлого зерна гранулы до образования плотной гранулы – взаимодействие различных сил, определяемых плотностью агрегативной структуры, свойствами и соотношением фаз дисперсных систем, подвергаемых гранулированию и окатыванию.

Гранулированию подвергалась сухая сыворотка, полученная в сушильном аппарате распылительного типа. Ее состав и свойства приведены в таблице 3.10.

Предметом исследования являлись структурно-механические свойства сыворотки и композиций на ее основе, оказывающих значимое влияние на характер процесса гранулирования методом окатывания.

Таблица 3.10 – Состав и свойства сухой молочной сыворотки

Показатель	Характеристика показателя
Содержание сухого вещества, % по массе	95,6..98,2
в том числе:	
углеводы	68,4..71,5
белки	12,13..14,15
зола	4,39..6,38
жиры	1,0..1,5
Кислотность после восстановления до содержания сухого вещества 6,5% по массе, °Т	13..70
Растворимость, мл сырого остатка	0,1..0,3
Размер частиц, мкм	10..40
Внешний вид	порошок, состоящий из частиц сферической формы, состав полидисперсный

К таким характеристикам можно отнести: угол естественного откоса (γ); насыпной вес (ρ); пластическую деформацию; коэффициент внутреннего трения и внешнего трения по поверхностям. Значения насыпного веса и угла естественного откоса порошка молочной сыворотки и гранулированной смеси на ее основе представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Структурно-механические характеристики молочной сыворотки

Вид продукта	Насыпной вес, кг/м ³	Угол естественного откоса, градусы
Сухой порошок молочной сыворотки	730..860	40
Сухая гранулированная смесь на основе молочной сыворотки	1100..1500	33,5

Сухие гранулы, изготовленные на основе молочной сыворотки, имеют больший насыпной вес и меньший угол естественного откоса, по сравнению с сывороточным порошком. Таким образом, гранулы более подвижны относительно друг друга.

Экспериментально определены сдвиговые и прочностные характеристики сухого гранулята молочной сыворотки. В первом случае использовался прибор,

имеющий бесконечную плоскость сдвига. Во втором случае применялся прибор, имеющий цилиндрическую ячейку. Значения сдвиговых и прочностных характеристик установлены при комнатной температуре и влажности сыворотки 3,7..4,0%.

Основными ограждающими поверхностями при проведении эксперимента выбраны сталь (шероховатость поверхности R_a10) и транспортерная резина. Сопротивления сдвигу – удельное τ , начальные τ_0 , всех ограждающих поверхностей $\tau_{огр}$ – возрастают с ростом нормального напряжения σ и предварительно напряженного состояния $\sigma_{упп}$. Экспериментальные значения сопротивлений и напряжений положены в основу расчета коэффициентов внешнего f_1 и внутреннего f трения, основанного на выражении:

$$f = \frac{\tau - \tau_0}{\sigma} \quad (3.15)$$

Значения коэффициентов внутреннего трения превосходят значения коэффициентов внешнего трения. Большие значения коэффициентов трения гранул по внешним поверхностям рассчитаны для транспортерной резины, меньшие – для стали. Это обусловлено тем, что в случае использования резины в качестве ограждающей поверхности трение скольжения заменяется трением качения.

Получение гранул продукта окатыванием становится возможным лишь в области пластических деформаций. В связи с этим одним из важных показателей можно назвать пластическую прочность гранулированного продукта. Кривая, характеризующая зависимость пластической прочности сухой гранулированной молочной сыворотки от влагосодержания, показана на рисунке 3.11. Эксперименты по изучению закономерностей гранулирования методом окатывания проводились на модельных образцах.

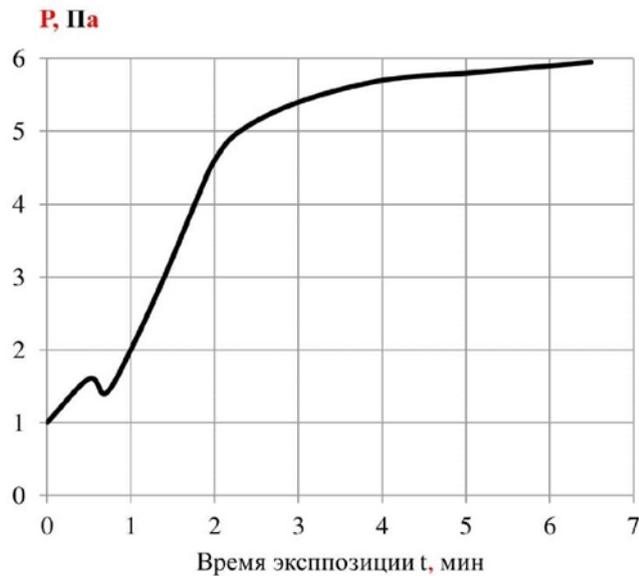


Рисунок 3.11 – Динамика значений пластической прочности, увлажненной и виброуплотненной молочной сыворотки

Эффективность процесса гранулирования влажных дисперсных материалов методом окатывания во многом определяется кинетикой капиллярного влагообмена. Данный процесс заключается в непрерывном уплотнении гранулы продукта и постепенном снижении интенсивности влагообмена, пропорциональном уплотнению комкуемого дисперсного материала. Экспериментально подтверждено, что капиллярная пропитка материала – очень медленный процесс вследствие повышения вязкости.

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 4.6. 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.

Таким образом, при исследовании пластической прочности установлено, что увеличение содержания сухого вещества молочной сыворотки более 75% по массе повышает способность продукта к образованию прочных твердых структур. Соотношение «твердое вещество – вода» в области «блокообразования», кроме того, присутствует так называемый «запас» сухого вещества, способного «связать» и удержать влагу. По этим причинам и наблюдается достаточно интенсивный процесс затвердевания увлажненной сухой молочной сыворотки.

Для сухого гранулята молочной сыворотки оптимальное значение влажности составляет 11%. Для сывороткосодержащих сухих гранулированных продуктов с добавлением плодово-ягодного сырья оптимальная влажность находится на отметке 13%. Таким образом, влажность при гранулировании молочной сыворотки ограничена узким интервалом от 10,5 до 11,5%.

Результаты экспериментальных исследований показали, что не только содержание жидкой фазы в растворимом порошке и его свойства определяют пластические характеристики продукта. Они во многом зависят от характера и особенностей связи твердой и жидкой фаз. В ходе эксперимента образцы сухих гранулированных смесей увлажнялись до значения влажности 2,5%. При этом наблюдалось снижение пластической вязкости исследуемого продукта, это связано на наш взгляд с образованием на поверхности гранулята пленки, которая приводила к смазывающему эффекту. Данное заключение было подтверждено с помощью расчетных значений. Капиллярно-адсорбционная сила связи напрямую зависит от влажности гранулированного продукта, так при влажности материала равной порядка 11% наблюдается максимальное значение пластической прочности. Увлажнение сывороточного порошка вызывает сначала его частичное, затем полное растворение, что приводит к снижению пластичности продукта.

Сложность процесса гранулирования дисперсных пищевых систем обусловлено многообразием форм связей фаз между собой (электростатический, капиллярно-адсорбционных, молекулярных и химических), так в процессе создания гранулированного продукта периодически наблюдается превалирующее действие одних или других сил их взаимодействия. При создании

гранулированных продуктов используются полидисперсные системы, в этой связи на процесс структурообразования напрямую оказывают влияние структурно-механические и физико-химические параметры каждой из фаз, характера их взаимодействия и свойства комкуемости дисперсного материала под воздействием температур и внешних механических сил, участвующих в процессе производства. И, несомненно, что свойства твердой фазы в составе полидисперсной пищевой системы имеют преобладающее значение. Дисперсная пищевая смесь на основе порошка молочной сыворотки и шрота плодово-ягодного сырья сформирована частицами разной геометрической формы и размеров. Эти особенности частиц твердой фазы обуславливают закономерности образования порового пространства гранул. В связи с этим необходимо всестороннее – научное и практическое – изучение удельной поверхности и среднего поверхностного диаметра частиц дисперсных сред, подвергаемых гранулированию.

Средний диаметр частиц ($d_{ср.пов.}$, мкм) определяется зависимостью:

$$d_{ср.пов.} = \frac{6}{S_{уд} * \rho_{ист}} \quad (3.16)$$

Эмпирические значения удельной поверхности и среднего поверхностного диаметра частиц приведены в таблице 3.12.

Можно заключить, что дисперсная пищевая система, подвергаемая гранулированию методом окатывания, включает в свой состав структурный грубодисперсный каркаса, размер частиц которого может варьироваться от 50 до 250 мкм, и тонкодисперсную фракцию (мука на основе плодово-ягодного шрота, молочная сыворотка).

Частицы твердой фазы в составе полидисперсной пищевой системы обладают хорошо развитой поверхностью, что обуславливает высокую свободную энергию системы. По законам физики дисперсная система стремится снизить эту энергию, за счет чего и возникает свойство смачивания и агрегации частиц твердой фазы. Наибольшая поверхностная активность, обусловленная

наибольшей поверхностью фазы, характерна для тонких коллоидных и полукolloидных фракций, даже в случае их относительно малого содержания.

Таблица 3.12 – Свойства дисперсных материалов

Наименование	$d_{\text{ср.пов.}}$, МКМ	$S_{\text{уд}}$, м ² /кг	$\rho_{\text{ист}}$, кг/м ³
Крахмал картофельный	115,0	317,6	1640
Мука плодовая (из моркови)	38,6	1680,8	970
Мука плодовая (из ранетки)	41,2	1636,3	890
Мука ягодная (из аронии)	90,9	815,5	1080
Мука ягодная (из черники)	43,6	1360,2	830
Сахарная пудра	10,9	415,5	1580
Смесь для гранулята сухой молочной сыворотки с ягодным шротом	98,9	3951,6	1520
Сухая, деминерализованная сыворотка молочная (подсырная)	97,0	255,6	740
Сухое молоко (обезжиренное)	104,2	405,5	1420

Сухой продукт состоит из гранул, имеющих капиллярно-пористую структуру. Именно она и определяет свойства и характеристики сухого продукта. Пористость зависит от температурного и влажностного режимов процесса гранулирования. Структура гранулы продукта видоизменяется в процессе поглощения паров жидкой фазы, как правило, воды. При этом в гранулах происходят процессы растворения сахарной пудры, впитывания воды крахмалсодержащими компонентами, трансформация аморфного состояния молочного сахара в кристаллическое, переход белковых веществ в коллоидное состояние. Пористость гранул при этом претерпевает значительные изменения. Появляются новые поры, трещины, капилляры в результате кристаллизации молочного и других сахаров. Контакт крахмалсодержащего сырья, а также белковых соединений с водой приводит к их набуханию, это в свою очередь влечет за собой изменение структурно-механических свойств гранул. При увлажнении гранулы и набухании исходных компонентов агломерата происходит перераспределение энергии внутри объекта и белковые соединения также, как и крахмал приводят к устранению трещин и сужению образованных капилляров. Пористость твердых частиц быстрорастворимых напитков, содержащих

наполнители растительного и животного происхождения, в том числе молочную сыворотку, значительно снижается по мере их увлажнения.

В основу изучения изменения пористости гранулированных продуктов – напитков и сыворотки – положен метод определения скорости проникновения жидкой фазы в гранулы продукта без растворения ее компонентов. Пористость рассчитывается как соотношение объема жидкой среды (керосина), проникающей в гранулу продукта к объему гранулы:

$$П_{ПОР} = \frac{V_2 - V_3}{V_1} \times 100\% \quad (3.17)$$

где: $П_{ПОР}$ – показатель пористости состава молочной сыворотки и киселя;

V_1 – объем частицы гранулята, мм³;

V_2 – исходный объем керосина, мм³;

V_3 – конечный объем керосина, мм³.

На рисунке 3.12 представлены результаты исследований пористости полученных гранул в состав которых входила молочная сыворотка, от дисперсного состава продукта.

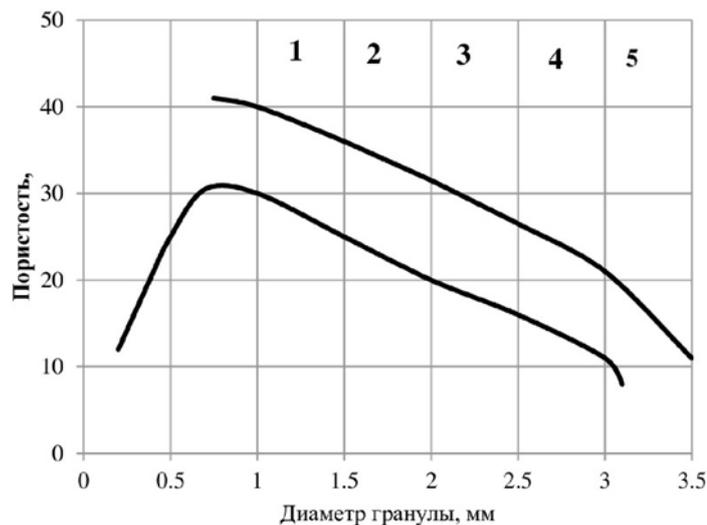


Рисунок 3.12 – Влияние гранулометрического состава молочной сыворотки и киселя на пористость гранулы

Результаты экспериментальных исследований показали, что увеличение диаметра гранул сыворотки и киселя приводит к снижению их пористости. На основании экспериментальных данных установлен оптимальный

гранулометрический состав быстрорастворимого киселя. Размер гранул продукта необходимо поддерживать в диапазоне от 1 до 3 мм.

Исследовались прочностные характеристики сухих гранул молочной сыворотки с влажностью 4–4,6% и сырых – с рабочей влажностью процесса гранулирования 9,1–10%. Результаты, полученные методом раздавливания, представлены на рисунке 3.13.

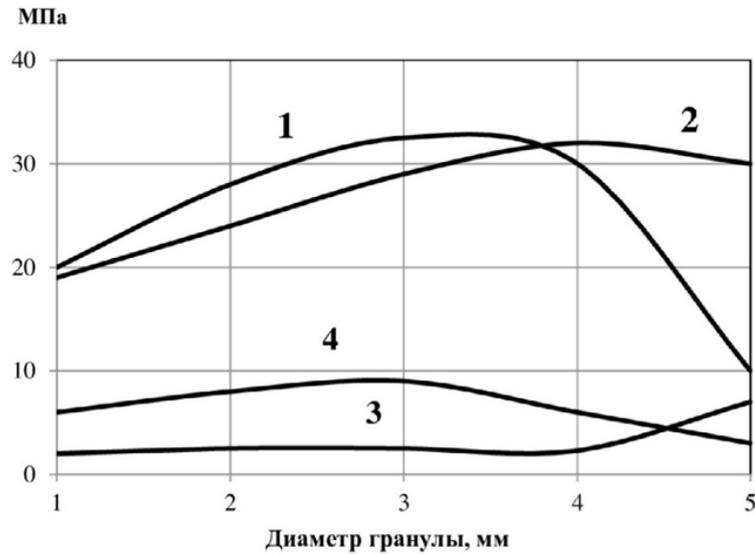


Рисунок 3.13 – Влияние диаметра гранулы на ее прочность на раздавливание:

- 1 – сухая сывороточная гранула; 2 – сухая композиционная гранула;
3 – влажная сывороточная гранула; 4 – влажная композиционная гранула

Анализ экспериментальных кривых 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, что обусловлено ее тиксотропными свойствами. 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.

Для сравнительного анализа получаемых гранул вводится значение удельной прочности, которое может быть определено через следующее выражение:

$$P_p = \frac{P}{\pi R^3}, \quad (3.18)$$

где: P_p – удельная прочность получаемой гранулы;

P – предельная нагрузка, при которой происходит разрушение агломерата кг;

R – радиус гранулы, мм.

Механические характеристики гранул в составе готового продукта зависят от их геометрической формы, неоднородности и наличия дефектов пористой структуры, и, как следствие, имеют широкий разброс. Анализ зависимостей, представленных на рисунке 3.13, позволяет говорить о разбросе прочности гранул молочной сыворотки. Максимальное значение прочности имеют гранулы размером до 3,5 мм, что объясняется возможностью образования микротрещин, снижающих их механическую прочность.

3.5 Формирование структуры гранулы при 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.

Процесс сушки, характеризующийся удалением влаги из гранулируемой смеси, приводит к трансформации её фазового состава. Такая трансформация приводит к снижению величины прослоек жидкой и газовой фазы между частицами твёрдой фазы, прочности гранул вследствие увеличения доли жидкой фазы в грануле. Такое увеличение процентного содержания жидкой фазы происходит вследствие растворения растворимых компонентов, таких как сахар, лактоза, фруктоза, либо расслоения влагоёмких компонентов, таких, как крахмал. Отсюда, исследование корреляции влагосодержания дисперсных систем и их структурных характеристик является ключевым вопросом процесса сушки.

Принимая во внимание вышеизложенное, были проведены исследования изменений реологических свойств поровых суспензий в зависимости от температуры прогрева гранул. Результаты исследований приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 –Зависимость реологических свойств от температуры прогрева гранул

Реологические параметры	Температура, °С			
	20	30	40	50
Θ , дин/см ²	270	290	340	470
η_1 , пуаз	2,24	1,68	1,26	1,02
ψ_1 , сек-1	113	121	142	196

Чувствительность материалов к сушке определялась как отношение воды капиллярно-подвижной к воде капиллярно-неподвижной. Оценку такой чувствительности можно произвести по следующей зависимости:

$$K_C = (W_i - W_{\text{нкв}}) / W_{\text{нкв}} = 1/C, \quad (3.19)$$

где: W_i - формовочная влажность массы;

C - связность материала.

Формула (3.19) показывает обратно-пропорциональную зависимость чувствительности полидисперсной смеси к сушке от её механической прочности, т.е. связности.

Подводя промежуточный итог вышесказанному, можно констатировать, что усадка смеси в процессе сушки, её (смеси) способность оказывать сопротивление напряжениям, возникающим при усадке, определяются свойствами гранулируемой смеси. Этими же свойствами определяется и возрастание W_i , которое происходит вследствие растворения (частичного) частиц смеси при увеличении температуры.

К основным факторам, оказывающим влияние на формирование структуры, объёмные изменения гранулируемого материала, происходящие в процессе сушки, относятся свойства самой гранулируемой смеси, а также регулирующие интенсивность и продолжительность влагоудаления задаваемые режимы процесса. От свойств гранулируемой смеси, которые могут оцениваться также с помощью водно-физических характеристик, например $W_{\text{нкв}}$, зависит допустимая интенсивность бездефектной сушки.

Для оценки трансформаций смеси при её сушке могут использоваться объёмные фазовые характеристики и параметр «П».

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 ($V_{\text{пор}}$) и его усадки ($V_{\text{ус}}$). Соответственно, она равна сумме объёмов жидкой и газовой фаз исходной полидисперсной смеси до начала процесса сушки

$$V_{\text{ус}} + V_{\text{пор}} = K_{\text{ж1}} + K_{\text{Г1}} = 1 - K_{\text{Т1}}, \quad (3.20)$$

где: $V_{\text{ус}} = K_{\text{Т2}} - K_{\text{Т1}}$; $V_{\text{пор}} = 1 - K_{\text{Т2}}$.

Мониторинг методик оценки чувствительности гранулируемых смесей к сушке позволил сделать вывод о преимуществах разработанного нами энергетического критерия «П». 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 $K_{\text{Т2}}$ и n ;

- при существенном повышении содержания в агломерате твердой фракции (сахарной пудры и крахмала) наблюдается рост объёмных 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;

- сумарный объем пор и усадки материала после проведения процесса сушки равен объему жидкой и газовой фаз, которые присутствовали во влажном гранулируемом продукте до удаления из него влаги.

Анализ данных по сушке дисперсного материала позволил определить зависимость между содержанием твердой фракции растворимой в воде от температуры сушильного агента. Данный факт свидетельствует о том, что снижение прочности гранул в первый период сушки связан с повышением содержания концентрации жидкой фазы и понижением содержания твердой фазы в агломерате, поскольку твердая фракция частично меняет свое агрегатное состояние и переходит в жидкое состояние.

С целью минимизации данного недостатка внедрялась технология «сушки со спутником». Она подразумевала собой введение на заключительной стадии получения гранул, внесение вещества (сахарной пудры) обладающей высокой сорбционной способностью, что позволяет существенно увеличить скорость миграции влаги из центральной части гранулы к ее периферии, поскольку в первый процесс сушки удаляется поверхностно-активная влага, то она удалится быстрее. На втором этапе сушки имеет место миграция сушки от центра к периферии, при этом скорость миграции напрямую зависит от структурно-механических и физико-химических свойств высушиваемого сырья. Второй этап не поддается изначальным описаниям математических моделей без исследования свойств продукта, в этом и заключается сложность определения процесса сушки. При внедрении «сушки со спутником» наблюдается существенная интенсификация процесса удаления влаги именно во второй период сушки влажного гранулята.

При анализе полученных результатов проведенных исследований по определению связности получаемого гранулята были получены следующие выводы:

- при увеличении содержания в твердой фазе мелкодисперсной фракции до 8-14% наблюдается рост связности получаемого гранулята. Данный факт может быть основан на том, что при распределении мелкой фракции происходит заполнение пустот между частицами большего размера и наблюдается более плотная укладка частиц в агломерате, а уплотнение частиц повышает сил межмолекулярного сцепления;

- при отсутствии возможности изменения зернового состава исходного сырья, возникает необходимость повышения когезионных свойств порошкового вещества, за счет внедрения веществ, позволяющих существенно снизить вязкость. К перечню веществ, которые могут существенно снизить вязкость порошковой суспензии можно отнести ПАВ, молочные белки и т.д.

- при внедрении гидрообразующих пищевых добавок наблюдается снижение количества капиллярно-связанной жидкости, за счет получения химически связанной жидкости, в конечном итоге добавление данных веществ существенно снизит удельные энергозатраты на проведение наиболее энергоемкого процесса при производстве инстантированных гранулированных продуктов питания;

- с целью снижения количества связующего раствора возможно проведение процесса гранулирования при повышенной температуре, с целью снижения его вязкости, это утверждение справедливо для вязких структур.

Свойства исследуемой смеси находятся во взаимодействии; одни влияют на другие. Так, например, (из тех, что нас интересуют), водно-физические свойства материала определяются теплофизическими и структурно-механическими. 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, расчеты теплоёмкости ведутся по массе материала. А так как масса прямо пропорциональна объёму влажной смеси, расчёт её теплоёмкости проводится не по массе, а по объёму (объёмным долям). При этом учитываются объёмные доли всех фаз – составляющих полидисперсной смеси:

$$c_{\text{вл}} = c_{\text{т}}K_{\text{т}} + c_{\text{ж}}K_{\text{ж}} + c_{\text{г}}K_{\text{г}}, \quad (3.21)$$

где: $c_{\text{вл}}$ - теплоемкость влажного материала;

$c_{\text{т}}$, $c_{\text{ж}}$, $c_{\text{г}}$, - соответственно теплоемкости твердой, жидкой и газообразной фаз.

Соотношение и термосопротивление фаз непосредственно влияет на коэффициент теплопроводности. Данный коэффициент может быть определен из следующей зависимости

$$\lambda_{\text{вкл}} = \frac{(K_m + K_{\text{жк}})/(1 - K_m)}{\frac{K_m * \alpha_1}{\lambda_{\text{Т1}}} + \frac{K_m * \alpha_2}{\lambda_{\text{Т2}}} + \frac{K_m * \alpha_3}{\lambda_{\text{Т3}}} + \frac{K_{\text{жк}}}{\lambda_{\text{Ж}}} + \frac{K_{\text{Г}}}{\lambda_{\text{Г}}}}, \quad (3.22)$$

где: $\lambda_{\text{Т}}$, $\lambda_{\text{Ж}}$, $\lambda_{\text{Г}}$, $\lambda_{\text{вкл}}$, - коэффициенты теплопроводности твердой, жидкой, газовой фаз и дисперсного материала;

α_1 , α_2 , α_3 – коэффициенты объемной концентрации составляющих твердой фазы для многокомпонентных смесей.;

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1.$$

Расчет коэффициента температуропроводности можно произвести, используя известные значения $c_{\text{вкл}}$, и $\lambda_{\text{вкл}}$ и обозначив величину плотности материала как $\rho_{\text{вкл}}$ ($a_{\text{вкл}} = \lambda_{\text{вкл}} / c_{\text{р вкл}} * \rho_{\text{вкл}}$).

Характер влияния влагосодержания исследуемой смеси на его теплофизические свойства показано на рисунке 3.14. Процентное содержание фракций смеси: шрот / сахар / крахмал / – 20 / 60 / 20.

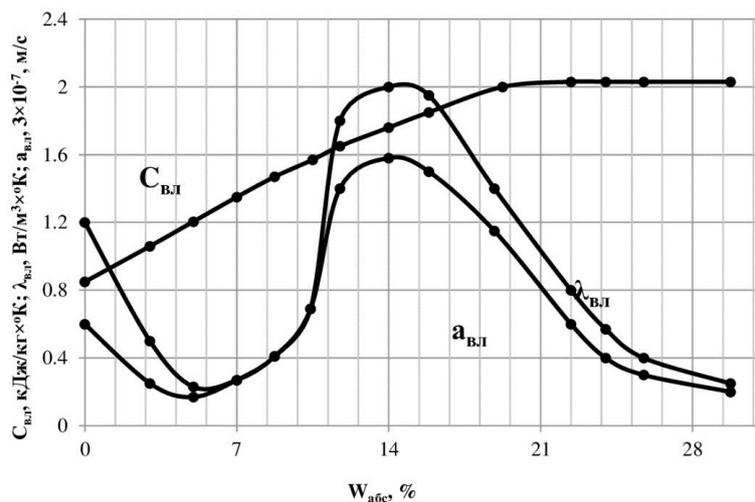


Рисунок 3.14 – Характер влияния влагосодержания исследуемой смеси на его теплофизические свойства

$\lambda_{\text{вкл}}$, и $a_{\text{вкл}}$ имеют максимальное значение в диапазоне $W = (11 - 15)\%$ (рисунок 3.14). Именно этот диапазон имеет $W_{\text{нкв}} = 12\%$, т.е. наименьшую

капиллярную влажность. Другими словами, в этом диапазоне во всем объеме гранулируемой смеси слой прочносвязанной воды приобретает свойство сплошности; процесс сушки в этом случае в большой степени зависит от воды в таком состоянии.

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.

Корреляция массы и объема влажных гранул при их сушке может быть представлена в следующем виде:

$$x_2 - x_1 = G_T \cdot \rho_{ж} \cdot (1/\rho_{T1} - 1/\rho_{T2}) / L, \quad (3.23)$$

где: $(x_2 - x_1)$ - разность влагосодержаний или интенсивность испарения влаги;

$(1/\rho_{T1} - 1/\rho_{T2})$ - разность удельных объемов или интенсивность усадки материала при сушке;

G_T - удельная производительность сушилки по сухому материалу, кг/ч;

L - удельный расход сухого сушильного агента, кг/ч.

Как заключение по данной главе можно резюмировать: в ходе анализа процесса формирования влагосодержащих (поли)дисперсных смесей с заранее устанавливаемыми формой и размерами гранул, их (процессов) прогнозирования, исследования 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.

Глава 4. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ГРАНУЛИРОВАНИЯ СЫВОРОТКОСОДЕРЖАЩИХ НАПИТКОВ

4.1 Технология гранулирования сыворотки и сывороткосо­дер­жащих композиций

Литературно-патентный обзор исследований свойств молочной сыворотки позволяет говорить о том, что благодаря структурно-механическим особенностям она является достаточно сложным веществом в аспекте гранулирования. Процесс гранулирования сухой молочной сыворотки осложняется тем, что она в высокой степени чувствительна к повышению влажности. Влажность оказывает прямое влияние на значение пластической прочности, как для порошка молочной сыворотки, так и для сыворотки в «блоке». Для молочной сыворотки оптимальное значение влажности, установленное по значениям пластической прочности, составляет 11%..13%. Таким образом, при гранулировании композиций на основе сухой молочной сыворотки с добавлением ягодных шротов необходимо внести от 7% до 9% влаги, поскольку сухая сыворотка содержит в среднем 2–4% влаги. Данное соотношение установлено эмпирически.

Кривые, представленные на рисунке 3.3, показывают, что стабильность процесса гранулирования молочной сыворотки обеспечивается присутствием активатора в гранулируемой смеси. Также кривые позволяют определить предельное время процесса гранулирования молочной сыворотки.

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. Изучение закономерностей мокрого гранулирования порошка молочной сыворотки возможно с использованием метода «свободной капли». При этом основным

показателем является комкуемость и динамическая плотность частиц гранулята смесей на основе молочной сыворотки. Скорость формирования гранул практически совпадает со скоростью затвердевания порошка сыворотки, подвергаемого увлажнению. Результаты экспериментальных исследований позволили выбрать «сухой» способ гранулирования молочной сыворотки, предполагающий внесение жидкого раствора концентрированной сыворотки.

Выбранная технологическая схема предполагает периодический характер процесса гранулирования. Порошок молочной сыворотки насыпается на тарель гранулятора, расположенную под углом 45° к горизонтали. В процессе гранулирования тарель вращается с минимальной скоростью 20об/мин, активатор вращается со скоростью 200 об/мин. Скорости вращения тарели и активатора в процессе проведения эксперимента плавно изменялись. Угол наклона тарели и скорость ее вращения, а также анализ проб, отбираемых из разных точек гранулятора, позволили установить режим переката.

В качестве увлажняющих сред использовались вода и концентрат молочной сыворотки, состав которого представлен в таблице 4.1. Увлажняющая среда вносилась в гранулятор через форсунки гидравлического (безвоздушного) распыления.

Таблица 4.1 – Состав концентрата молочной сыворотки

Показатель	Значение показателя
Концентрация сухого вещества, % по массе	40
Титруемая кислотность, не выше, °Т	550
Плотность, кг/м ³	1160-1180

Траектория движения смеси на тарели в процессе гранулирования изменялась с помощью отбойного ножа. Существенным режимным параметром процесса гранулирования в грануляторе тарельчатого типа является влажность исходной смеси и влажность процесса окатывания. Технологическое решение предполагает подачу сгущенного концентрата сыворотки с содержанием сухого вещества в диапазоне от 40 до 70% по массе в гранулятор при температурах,

близких к температуре пастеризации. Это позволяет снизить вязкость жидкой фазы и, соответственно, уменьшить энергетические затраты на сушку.

Значения оптимальной влажности процесса гранулирования молочной сыворотки окатыванием, установленные экспериментально, показаны в таблице 4.2.

Анализ значений показателей процесса гранулирования, представленных в таблице 4.1, позволяет говорить о том, что окатывание сыворотки в грануляторе тарельчатого типа возможно при различной степени влажности исходной смеси.

Процесс окатывания при влажности смеси 9..11,5% позволяет получить окатыш с правильной геометрической формой, высокой степенью однородности и плотным сложением. Размеры 10% полученной массы окатышей отличаются от классифицированных размеров. Процесс окатывания при указанной влажности осуществляется полностью. На вид полученные окатыши не блестят, т.е. их поверхность является сухой. Размер окатышей однородный.

Повышение влажности до 13% при фиксации значений остальных режимных параметров нарушает однородность формы и размеров полученного окатыша. Окатыши слипаются, т.е. процесс окатывания нарушается.

Сухой сывороточный порошок содержит значительное количество водорастворимых веществ, которые в концентрированном виде характеризуются высокой вязкостью и липкостью. Это приводит к тому, что сухая сыворотка в процессе гранулирования достаточно быстро образует бесформенные агломераты. При этом на начальном этапе обработки преимущественно формируются зародыши в виде рыхлых комков различных размеров и формы. В процессе дальнейшего окатывания под действием сил они уплотняются. Однако для дальнейшего упрочнения объема гранулы влаги не достаточно. Поступающая влага (увлажняющая среда) из форсунок аппарата приводит к переувлажнению гранул, т.к. скорость их капиллярной пропитки остается низкой. Гранулы слипаются, образуются гранулы больших размеров (свыше 10 мм). Из мелких гранул (0,5..3 мм) в грануляте формируются «ёжеподобные» твердые прочные агломераты. Крупные гранулы, снятые с гранулятора только что, по своей

структуре представляют собой рыхлую сердцевину, заключенную в достаточно прочную поверхность. Со временем влага распределяется в объеме гранулы, и их структура изменяется.

Таблица 4.2 – Экспериментальные данные по выявлению оптимальной влажности

№ п/п	Влажность гранулирования, W, %	Угол наклона тарели, α, град.	Частота вращения ротора, n, об/мин	Распределение размеров окатышей, мм, %			Примечание
				0,5-1	1-3	3-5	
1	6	40	28	2,0	34,6	59,4	окатыши слипаются
2	6	45	24	12,8	52,4	44,8	частичная грануляция
3	8	40	28	6,8	33,6	49,6	гранулы неправильной формы
4	8	45	28	2,1	75,9	22,0	хорошо
5	8	45	24	13,5	49,6	36,9	частичная грануляция
6	9	45	28	1,0	91,2	7,8	хорошо
7	9	45	32	2,6	63,7	23,7	удовлетворительно
8	10	40	28	3,4	56,4	40,2	удовлетворительно
9	10	50	28	35,8	52,9	11,3	удовлетворительно
10	10	50	28	3,8	80,2	16,0	хорошо
11	10,5	45	28	2,6	79,1	18,3	хорошо
12	11	50	28	3,3	76,4	20,3	хорошо
13	11	45	28	1,5	89,7	8,8	хорошо
14	12	40	28	33,2	46,8	20,0	частично гранулируется
15	12	45	28	21,7	53,7	24,6	удовлетворительно
16	12	45	32	2,8	80,1	17,1	удовлетворительно
17	14	45	28	80,7	19,3	-	частично гранулируется
18	14	50	28	86,1	13,9	-	частично гранулируется
19	15	45	28	4,1	36,2	59,7	окатыши слипаются
20	15	50	28	5,7	41,4	52,9	окатыши слипаются
21	16	40	28	91,3	8,7	-	не гранулируется
22	20	50	28	-	-	-	не гранулируется
23	25	40	28	-	-	-	не гранулируется
24	25	45	28	-	-	-	не гранулируется

Изменение характера подачи увлажняющей среды в гранулятор с постоянного на прерывистый, учитывающий время проникновения влаги в гранулу и время ее распределения внутри гранулы, позволило изменить структуру частиц гранулята. Гранулы стали более правильной геометрической формы, приближенной к шарообразной. Этому способствовало снижение уплотнения внешней поверхности гранулы в начальный момент ее образования. Таким образом, порционное введение увлажняющих сред в процессе гранулирования с учетом времени распределения влаги во внутренней структуре гранулы значительно улучшает характеристики полученного гранулята. Причем увеличение количества порций вносимой влаги значительно повышает сферичность гранулы и стабильность их размеров.

Высокая скорость ввода увлажняющих сред в гранулятор и большие порции также способствуют, с одной стороны, повышению скорости гранулообразования, но, с другой стороны, приводит к увеличению присутствия крупных гранул (свыше 8 мм), т.е. гранулометрический состав полученного гранулята неравномерен. Присутствие влаги свыше 1,5% относительно оптимальных значений вызывает нарушение процесса за счет значительного слипания частиц и образования «блока» агломератов, для которых характерна высокая пористость.

Оптимальный размер гранул смесей на основе молочной сыворотки составляет 1..5) мм. Диапазон значений размеров гранул установлен на основе данных, представленных в [73, 75, 93, 120, 136, 142, 186, 192, 229], а также эмпирически по показателям слеживаемости [164] и растворимости [141].

Обеспечить оптимальный размер гранул, их характеристики – насыпную плотность, растворимость, а также надлежащий товарный вид гранулята позволяет использование конструкций грануляторов с активатором, разработанных автором диссертационного исследования. Указанные характеристики гранулята смесей на основе молочной сыворотки, а также его насыпной вес корректируются соотношением режимных параметров процесса гранулирования. Главным образом они зависят от скорости вращения активатора и количеством влаги, вносимой увлажняющими средами. Как отмечено ранее,

увеличение количества влаги приводит к укрупнению гранул и снижает их растворимость. В свою очередь, повышение скорости вращения активатора понижает размер частиц гранулята, но и ухудшает их растворимость. Это происходит из-за того, что механическое воздействие со стороны лопастей активатора приводит к значительному уплотнению гранулы. При этом степень такого воздействия снижается при изменении конструкции рабочего органа активатора по его высоте.

Проведенные исследования позволили разработать технологию производства гранулированного напитка на основе плодово-ягодного сырья с добавлением концентрата молочной сыворотки (рисунок 4.1). Применение данной технологии способствует организации безотходного производства, а также позволяет получить напиток с высокой пищевой ценностью. При этом значительно упрощается самый трудоемкий и энергозатратный этап – этап сушки молочной сыворотки.

Плодово-ягодное сырье для производства гранулированного напитка готовят следующим образом. Сначала необходим отбор качественного сырья, которое затем подвергают промывке на конвейере. Далее следует измельчение и сушка плодово-ягодного сырья с последующим дроблением на дробилках вальцового или дискового типа. Достигается размер сухих частиц менее 0,2 мм. Полученная масса сепарируется в центрифуге или прессуется с целью ее разделения на мезгу и сок.

Полученный сок плодово-ягодного сырья процеживается с целью очищения от кусочков мезги, веточек, семян и др. Обычно используются сита из нержавеющей стали, имеющие пропускные отверстия порядка 0,75 мм. Также может быть использовано капроновое сито № 18. Сок плодово-ягодного сырья поступает в вакуум-аппарат ротационного типа и сгущается при 50-55°C. Процесс сгущения обычно длится 1,5-2 часа. При этом достигается содержание сухих веществ до 57-57,4% по массе.

Сгущенный сок охлаждается с целью предотвращения его кристаллизации. Далее идет стадия пастеризации сока плодово-ягодного сырья при 72°C в течение 15–20 с.

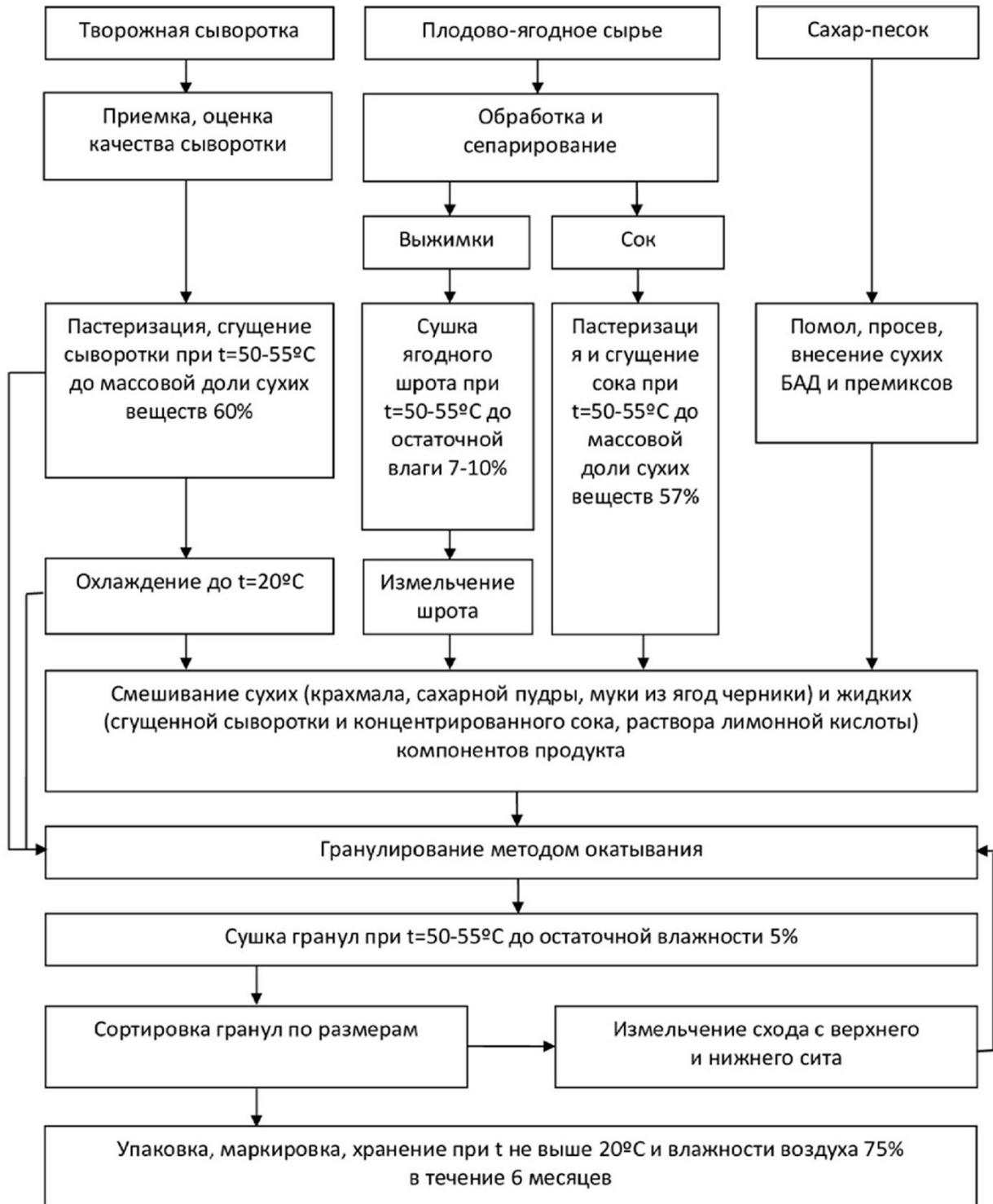


Рисунок 4.1 – Технологическая схема быстрорастворимого гранулированного киселя на основе молочной (творожной) сыворотки с добавлением плодово-ягодного сырья

Мезга плодово-ягодного сырья подвергается сушке в вибро-кипящем слое при 50–55°C до влажности 8–10%. Сухую мезгу перемалывают на дезинтеграторе до состояния муки, размер частиц которой составляет менее 0,02 мм.

Далее подготавливают сыпучие компоненты смеси. Размер зерен картофельного крахмала должен быть от 2 до 150 мкм, поэтому его просеивают на ситах. Сахарный песок необходимо довести до состояния сахарной пудры и просеять.

Данная технология предполагает использование молочной (творожной) сыворотки надлежащего качества с содержанием сухого вещества 6% по массе и титруемой кислотностью менее 75°Т. Молочную сыворотку фильтруют на механических фильтрах и направляют в вакуумный выпарной аппарат, где подвергают пастеризации и сгущению при 50–55°C. На выходе вакуумного выпарного аппарата молочная сыворотка должна содержать примерно 60% сухого вещества по массе.

Если гранулирование проводится не сразу же после сгущения молочной сыворотки, ее нужно охладить до 20°C.

Сухие компоненты, необходимые для производства гранулированного напитка на основе плодово-ягодного сырья, необходимо тщательно смешать. После смесителя смесь муки из ягод черники, крахмал и сахар направляются в модернизированный гранулятор тарельчатого типа. Содержание жидкой фазы в смеси близко к оптимальным значениям, установленным ранее. Оптимум жидкой фазы в процессе гранулирования корректируется с помощью ввода сгущенной сыворотки путем ее напыления. На завершающем этапе процесса гранулирования с целью поддержания оптимального значения жидкой фазы используют порошок сахарной пудры в количестве 7% от массы сухого вещества готового продукта.

Полученный гранулят состоит из частиц, содержащих 88–91% сухого вещества по массе. Его подвергают сушке в воздушной среде при 50–55°C. По завершению сушки содержание сухого вещества должно составить 93–95% по массе.

Готовые гранулы-окатыши растворимого напитка (киселя) на основе плодово-ягодного сырья подвергают сортировке на виброситах. Сход с верхнего и нижнего сит поступают на измельчение или дальнейшую переработку.

Предложенная технология предполагает выработку гранулированного растворимого напитка при достаточно низких температурах, не превышающих 60°C. Такой температурный режим позволяет практически без потерь перенести витаминный комплекс сырья в готовый продукт.

Готовый гранулированный растворимый напиток, произведенный на основе черничного сырья и молочной (творожной) сыворотки фасуют в полиэтиленовую упаковку по 30 г и укладывают в коробки по 10 шт.

Способ приготовления быстрорастворимого гранулированного киселя на основе плодово-ягодного сырья прост. Нужно растворить порцию порошка (1 пакет) 30 г в 200 мл горячей воды.

Выработка опытной партии сухого быстрорастворимого гранулированного черничного киселя на основе молочной (творожной) сыворотки по предложенной технологии позволила разработать необходимую нормативную документацию – технологическую инструкцию, технические условия. Произведенный инстантированный продукт по заключению лаборатории соответствует требованиям нормативной документации. Проведен анализ органолептических свойств продукта дегустационной комиссией, которая также подтвердила их соответствие заявленным свойствам, представленным в нормативной документации.

Преимущество данной технологии – за сгущенной молочной сывороткой, тогда как существующие технологии предусматривали использование сухого сывороточного порошка. В соответствии с технологией концентрат молочной сыворотки и ягодная мука гранулируются вместе в грануляторах тарельчатого типа с активатором. Ягодное сырье за счет высокой влагоудерживающей способности клетчатки (до 23,7 г воды/г клетчатки [209,231]) обеспечивает высокий показатель влагоемкости ягодной муки. Следовательно, содержание молочной сыворотки может достигать 50% в пересчете на сухой остаток.

Полученный гранулят характеризуется однородным составом, имеет хорошую сыпучесть и прочность, что обеспечивает хорошую сушку в сушилках любого типа.

Присутствие наполнителя в виде жома плодово-ягодного сырья накладывает особенности на технологию процесса гранулирования молочной сыворотки. В первую очередь, становится неэффективным «сухой» способ гранулирования, т.к. в этом случае высока степень пылеобразования, а скорость пропитки при этом мала. При использовании в технологии производства сухого растворимого гранулированного напитка смеси ягодного шрота с добавлением концентрата молочной сыворотки лучше использовать «полумокрый» способ с предварительным ее увлажнением. Увлажнение компонентов перед их смешиванием повышает однородность гранул готового продукта и интенсифицирует процесс грануляции в целом. Заданная вязкость концентрата молочной сыворотки обеспечивается при поддержании температуры выше 50°C. Увлажняющая среда подвергается пастеризации при 72°C и подается через форсунки аппарата. Это позволяет уменьшить количество подаваемой жидкой фазы, значительно сэкономить энергозатраты и стабилизировать процесс грануляции в целом.

Наполнителем может быть, например, мука из жома ягодного сырья. Количество сока при прессовании зависит от вида ягод (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Количество отходов и жома при получении сока ягод

Ягодное сырье	Жом, %	Отходы, %
Брусника	27	34..36
Клюква	23	26..31
Красная смородина	27..36	37..46
Черника	23	26..33
Черноплодная рябина	35	51

При выжимке сока из ягодного сырья в нем остается лишь некоторая часть водорастворимых веществ, содержащихся в ягоде изначально. Оставшаяся часть переходит в жом.

Важный компонент ягодного сырья – клетчатка, которая необходима организму для нормального процесса пищеварения. Поэтому ягодный жом, в составе которого она содержится, является ценным сырьем. Кроме клетчатки в составе ягодного жома есть и другие ценные компоненты – крахмал, протопектин, жирорастворимые пигменты и витамины.

Жом ягодного сырья готовится следующим образом. После прессования он подвергается сушке до снижения влажности ниже 14%. Это необходимо для замедления биохимических процессов и предотвращения развития патогенной микрофлоры. Температура сушки не должна превышать 60..65°C, поскольку есть необходимость сохранения ценных биологически активных компонентов сырья. Высушенный жом измельчают до состояния муки, при этом частицы порошка жома должны проходить через сито с размером ячейки 0,25×0,25 мм.

Клетчатка в составе ягодного сырья обладает высокой водоудерживающей способностью (до 23,7 г воды/г клетчатки [246,273,336]). Поэтому мука жома ягодного сырья, включающая большое количество клетчатки, характеризуется значительной степенью влагоемкости. Кроме того, в ней почти нет водорастворимых веществ. Поэтому мука жома обладает высокой связывающей способностью: на одну часть муки может приходиться до двух частей сгущенной молочной сыворотки. Поэтому на ее основе могут вырабатываться комбинированные продукты, содержащие от 20 до 50% молочной сыворотки, которые применимы, например, в хлебопекарной и кондитерской отраслях, а также при производстве сухих быстрорастворимых гранулированных напитков. Автором диссертационного исследования разработаны и внедрены технологии производства быстрорастворимых киселей с разработкой сопутствующей документации (ТУ, ТИ, гигиенический сертификат).

Предложенные и апробированные технологии позволяют получить гранулят однородного состава с хорошей сыпучестью и прочностными характеристиками, позволяющими провести его сушку с применением сушильных аппаратов любого типа. При этом сушка проводится в щадящем температурном режиме, что позволяет сохранить пищевую ценность сырья.

4.2 Диагностирование технологии через параметр качества – восстанавливаемость

Свойства быстрорастворимого гранулированного напитка определяются не только свойствами входящих в него компонентов, но и строением присутствующих агломератов. Растворимость, главным образом, зависит от характера взаимосвязи частиц в составе агломератов, их размерами, пористостью и твердостью поверхности агломератов, количеством и размером частиц в их составе, распределением частиц в объеме агломерата, а также их гигроскопичностью.

Оценить готовый гранулированный продукт можно лишь с позиций изучения закономерностей процесса инстантирования. Известна следующая методика. Сухой гранулированный продукт массой 1 г размещают в контейнер, изготовленный из сетки с размером ячейки 0,25×0,25 мм. Контейнер крепится к аналитическим весам посредством гибкой связи и помещается в емкость с водой объемом 1 л. Со временем масса пробы по мере растворения сухого продукта в воде уменьшается, что фиксируется весами.

В результате исследования получены эмпирические кривые, отражающие кинетику инстантирования быстрорастворимого гранулированного киселя (рисунок 4.2).

Анализ кривых показывает, что скорость инстантирования киселя увеличивается в диапазоне температур 20–90°C. Это объясняется снижением вязкости воды, что способствует ее более легкому проникновению в капилляры гранулы напитка. Кроме того, возрастает скорость растворения сахарной пудры.

В диапазоне температур от 70°C до 95°C возрастает скорость набухания картофельного крахмала. При этом возникают два взаимонаправленных, но взаимодополняющих процесса: растворение сахарной пудры и почти мгновенное набухание картофельного крахмала. Последнее приводит к образованию слоя геля, что снижает скорость растворения сахарной пудры. Т.е. образуется

желеобразный продукт, в составе которого можно обнаружить фрагменты плодово-ягодной мякоти.

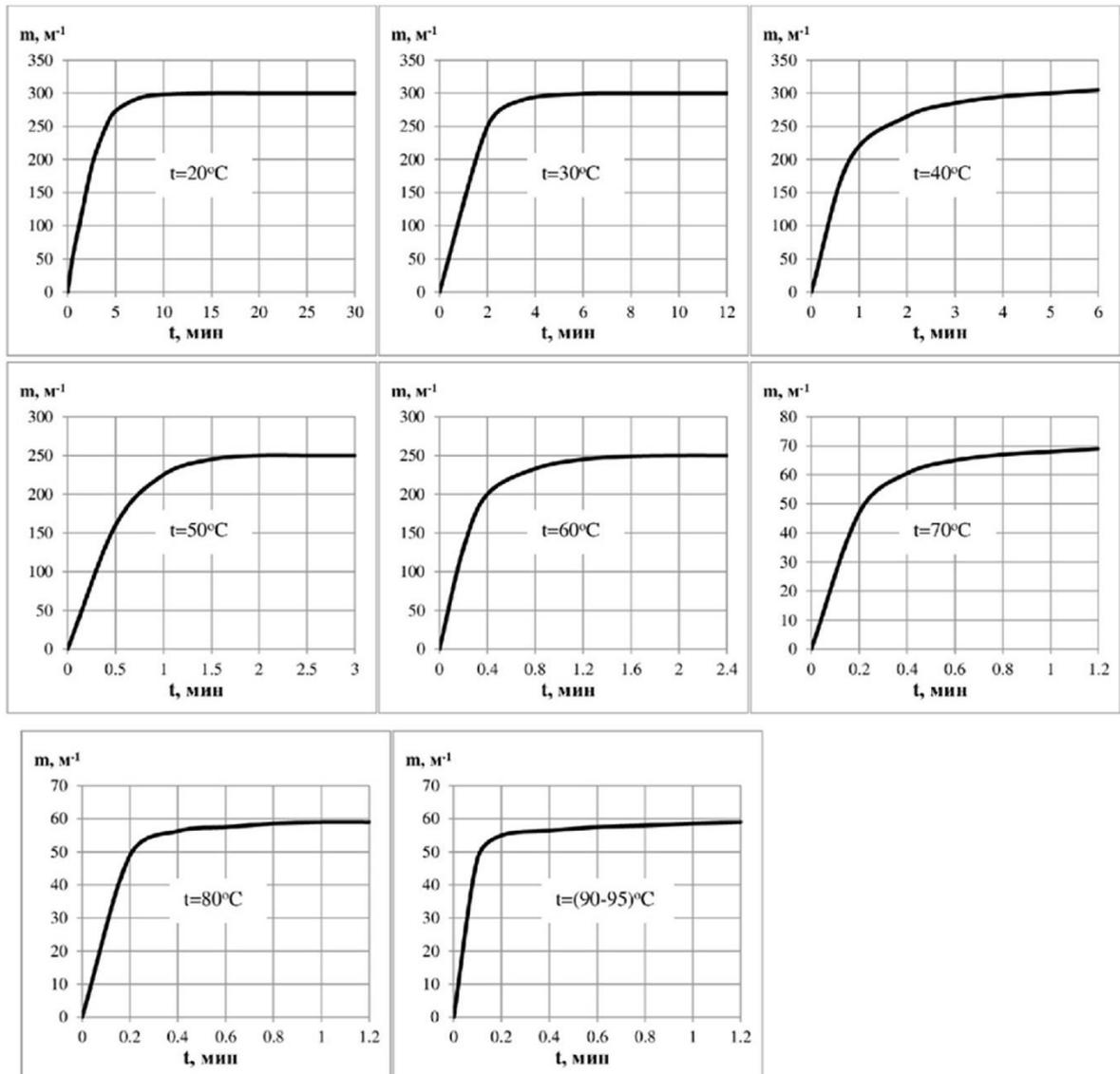


Рисунок 4.2 – Кинетические кривые процесса инстантирования черничного киселя при разных температурах

Основной вывод по результатам экспериментальных исследований заключается в том, что метод и режимы гранулирования сырья при производстве быстрорастворимых гранулированных плодово-ягодных киселей выбраны верно.

В настоящее время в пищевой отрасли существенно увеличился спрос на структурированные продукты, поэтому их производство развивается весьма динамично. В связи с этим необходимы технологии, обеспечивающие высокое качество готового структурированного продукта, который может долго храниться

без потери свойств и использоваться в качестве стабилизирующей пищевой добавки.

Присутствие стабилизаторов в рецептуре производства быстрорастворимого киселя или сока с мякотью способствует равномерному распределению мякоти плодово-ягодного сырья в объеме продукта. Поэтому картофельный крахмал в их составе обеспечивает не только высокую пищевую ценность продукта, но и выполняет функцию стабилизатора. При этом содержание крахмала в соке может достигать 3–5%, а в киселе 20–25%.

Консистенция готового продукта может быть оценена по его структурно-механическим характеристикам, которые могут быть установлены в результате реологических испытаний.

Экспериментально установлено, что температура является важным фактором в процессе восстановления киселя. При этом происходит структурообразование, заключающееся в превращении исходных компонентов сухой смеси в структурированную систему. Изучение механизмов структурообразования возможно с помощью реологических кривых течения восстановленного продукта. Реологические кривые демонстрируют поведение восстановленного продукта под воздействием внешних сдвиговых напряжений. Внешние сдвиговые напряжения могут достигать больших значений и привести к разрушению частиц структуры продукта.

Как правило, по результатам экспериментальных исследований строится кривая течения «напряжение сдвига – скорость сдвига». Характер изменения кривой сдвига позволяют установить численные значения структурно-механических параметров продукта.

Основные структурно-механические параметры, необходимые для изучения структуры и свойств сухих гранулятов пищевых продуктов – эффективная вязкость и предельное напряжение сдвига.

Получены реологические кривые течения восстановленного киселя, по которым установлено влияние температуры его восстановления на его

структурно-механические параметры (рисунки 4.3, 4.4). Аналитически они могут быть выражены зависимостями: $\tau = f(\dot{\gamma})$ и $\dot{\gamma} = f(D_r) = f(\gamma)$.

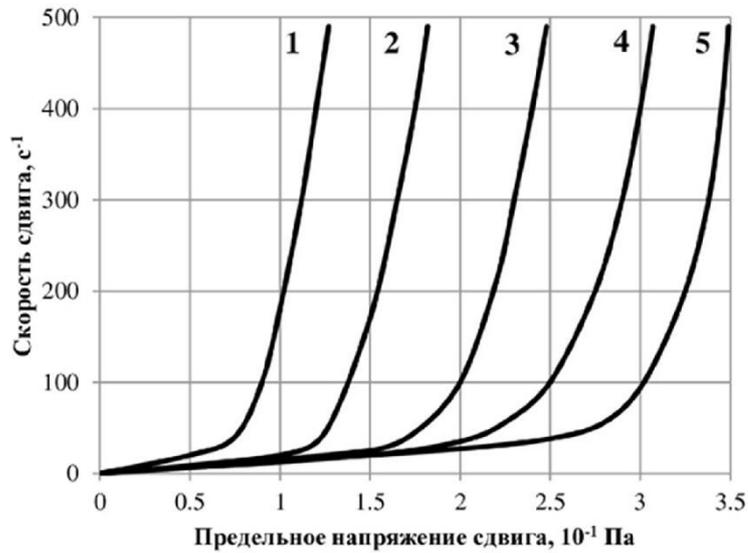


Рисунок 4.3 – Зависимость кривых течения сухого быстрорастворимого гранулированного черничного киселя от температуры процесса восстановления:
1 – 20°C; 2 – 30°C; 3 – 40°C; 4 – 50°C; 5 – 60°C

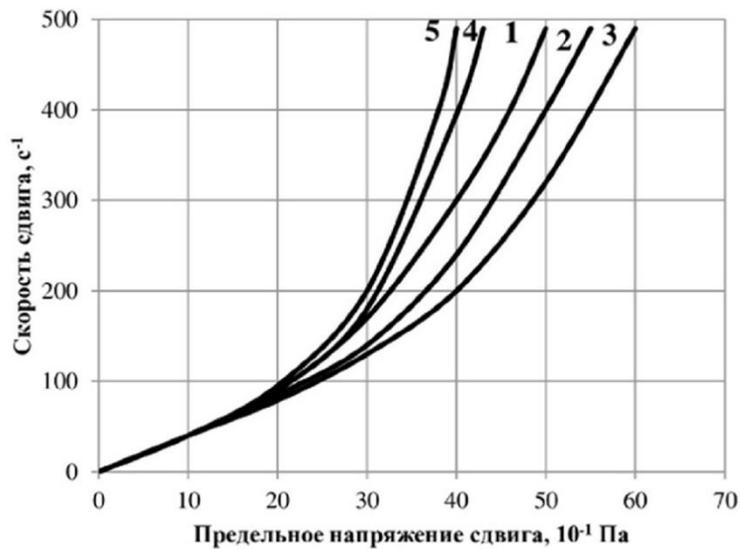


Рисунок 4.4 – Зависимость кривых течения и предельных напряжений сдвига сухого быстрорастворимого гранулированного черничного киселя от температуры процесса восстановления: 1 – 70°C; 2 – 80°C; 3 – 85°C; 4 – 90°C; 5 – 100°C

Анализ кривых позволяет выделить несколько интервалов изменения предельного напряжения сдвига. Начальный интервал температур – от 20 до 60°C – интервал незначительного изменения данного показателя. Следующий интервал

– от 70 до 85°C – интервал его интенсивного увеличения. Заключительный интервал – от 85 до 100°C – значение показателя уменьшается.

Также экспериментально установлено влияние скорости сдвига на эффективную вязкость восстановленного киселя в диапазоне температур от 20 до 100°C (рисунок 4.5).

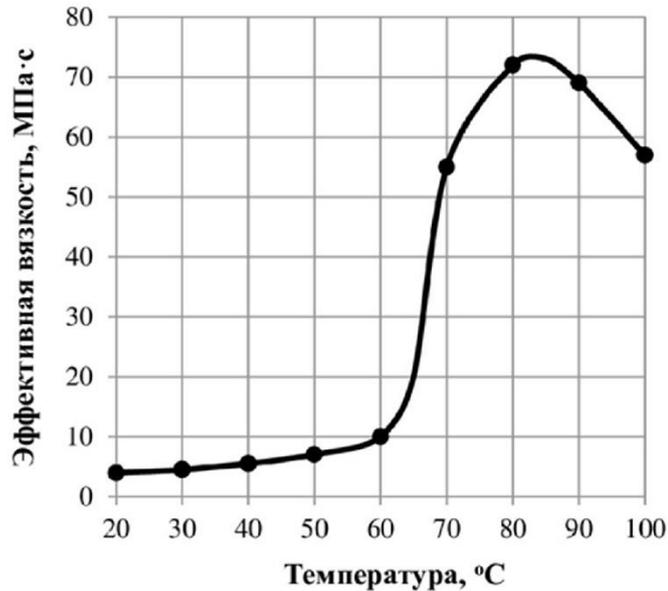


Рисунок 4.5 – Зависимость эффективной вязкости сухого быстрорастворимого гранулированного черничного киселя от температуры

Полученная кривая демонстрирует зависимость процесса восстановления (структурообразования) киселя от температуры. При температурах от 65 до 70°C скорость набухания крахмала в составе продукта резко возрастает. Однако эффективная вязкость продукта постепенно возрастает до 85°C. Но при повышении температуры до 100°C эффективная вязкость киселя снижается.

Характер кривой и описываемые ей процессы, происходящие при структурировании киселя, могут быть объяснены следующим. В диапазоне температур от 85 до 100°C происходит разрыв водородных связей, отсюда и наблюдается снижение вязкости продукта.

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 °С. Однако следует учитывать потерю тепла в процессе структурирования (заваривания) киселя, поэтому начальная температура должна составлять 95-100 °С.

4.3 Изучение состава, свойств, пищевой ценности сухой гранулированной сыворотки

Органолептические характеристики сухого гранулята молочной сыворотки представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Органолептические характеристики сухого гранулята молочной сыворотки

Показатель	Характеристика показателя
Цвет	Белый, с желтоватым оттенком
Консистенция, внешний вид	Частицы имеют сфероподобную форму и матовую поверхность. Гранулы плотные и компактные. Их размеры варьируются в интервале от 0,5 до 5 мм.
Запах, вкус	Частицы имеют слабовыраженный сывороточный запах. На вкус гранулы сладковато-солонваты, чуть кисловатые. Вкус близок к молочному. Посторонних привкусов нет.

В результате сенсорной оценки установлено, что потребительские свойства сухой гранулированной молочной сыворотки не уступают аналогам, в частности, сухой сыворотки, полученной методами пленочной или распылительной сушки. Физико-химические характеристики и химический состав продукта показан в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Состав и характеристики сухого гранулята молочной сыворотки

Показатель	Значение показателя
Содержание сухого вещества, % по массе	не менее 97,5
в том числе	-
молочный сахар	69..72
белковые соединения	18..20
жиры	1..2
зола	6..7
Кислотность молочной сыворотки, восстановленной до содержания 6% сухого вещества по массе, °Т	не менее 54..74
Растворимость, см ³ сырого остатка	не более 0,7

Особое значение приобретает безопасность продукта с позиций возникновения и развития патогенной микрофлоры. Как правило, в процессе хранения сухих молочных продуктов наблюдается отмирание микрофлоры, содержащейся в них изначально. Наряду с этим установлены факты повышения общей микробиальной обсемененности сухого молочного продукта в процессе хранения, в том числе появление бактерий группы кишечной палочки [180].

Эмпирически определены микробиологические показатели безопасности сухого гранулята сыворотки. Установлено, что полученные значения не превышают допустимые значения, установленные «Гигиеническими требованиями к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов» (СанПиН № 2.3.2.560-96), относящиеся к сухим молочным продуктам (таблица 4.6).

На основании вышеизложенного можно заключить, что выбор значений технологических режимных параметров производства сухой гранулированной молочной сыворотки, обеспечивающих безопасность продукта при использовании в пищевых целях, сделан верно и обоснованно. Также установлено, что переувлажнение продукта наступает очень быстро за счет высокой степени гигроскопичности сухой гранулированной сыворотки, что может вызвать бурный рост патогенной микрофлоры и, как следствие, порчу продукта.

Таблица 4.6 – Показатели микробиологической безопасности сухого гранулята молочной сыворотки

Показатель	Результаты экспериментального исследования	Норма, КОЕ/г
Патогенная микрофлора, в т.ч. сальмонеллы, в 25 г продукта	не обнаружены	не допускаются
Бактерии группы кишечных палочек в 0,1 г продукта	не обнаружены	не допускаются

Пищевая и энергетическая ценность являются важным показателем качества пищевого продукта. Анализ химического состава показал, что пищевая и энергетическая ценность сухой гранулированной молочной сыворотки, полученной предложенным способом, составляет 397 ккал.

Также важной характеристикой является биологическая ценность пищевых продуктов, которая зависит от наличия в них ценных пищевых компонентов, в частности, аминокислот. Содержание аминокислот в сухой гранулированной молочной (творожной) сыворотке, полученной методом окатывания в модернизированной конструкции гранулятора тарельчатого типа с активатором, представлено в таблице 4.7.

Анализ аминокислотного состава продукта показал, что соотношение незаменимых аминокислот близко к стандартной формуле ФАО. Наблюдается незначительный дефицит валина и метионина. Относительное содержание лейцина к изолейцину составляет $9,05:5,81 = 1,6$, что говорит о высокой биологической ценности полученной сухой гранулированной молочной сыворотки.

Показатель биологической ценности зависит от содержания витаминов в пищевом продукте. Витаминный комплекс, содержащийся в сухой гранулированной молочной сыворотке, полученной предложенным способом, отражен в таблице 4.8. Витаминный состав сухой гранулированной молочной сыворотки практически не отличается от витаминного состава свежей молочной

сыворотки. Этому способствуют щадящие температурные режимы технологических операций, входящих в предложенную технологию получения сухого быстрорастворимого гранулята с использованием модернизированной конструкции гранулятора тарельчатого типа с активатором.

Таблица 4.7 – Содержание аминокислот в сухом грануляте молочной сыворотки

Наименование аминокислоты	Содержание, г на 100 г белковых соединений
Незаменимые	48
в том числе:	-
валин	6,26
изолейцин	5,81
лейцин	9,05
лизин	6,47
метионин	2,99
треонин	6,68
триптофан	4,37
фенилаланин	6,37
Заменимые	52
в том числе:	
аланин	4,4
аргинин	2,2
аспарагиновая кислота	10,6
гистидин	2,0
глутаминовая кислота	17,8
пролин	4,9
серин	5,5
тирозин	2,5
цистин	2,1
Отношение к стандартной формуле ФАО, %	98,4

Биологическую ценность пищевого продукта также определяет его минеральный состав.

Минеральный состав сухой гранулированной молочной сыворотки преимущественно представлен неорганическими и органическими соединениями. Так, содержание неорганических веществ достигает 0,6–0,7% по массе, органических же чуть меньше – 0,1–0,4% по массе сухого вещества продукта.

Таблица 4.8 – Витаминный состав сухого гранулята молочной сыворотки

Наименование витамина	Содержание витамина, мг на 100 г сухого вещества
Жирорастворимые:	
токоферол (E)	0,078±0,002
ретинол (A)	0,014±0,005
Водорастворимые:	
аскорбиновая кислота (C)	0,980±0,054
кобаламин (B ₁₂)	0,230±0,032
пиридоксин (B ₆)	0,073±0,005
рибофлавин (B ₂)	0,056±0,008
ниацин (PP)	0,014±0,005
тиамин (B ₁)	0,010±0,020
биотин (H)	0,0012±0,0003

Микроэлементный состав формируется преимущественно цинком (190 мг/кг), также присутствуют кобальт (0,49 мг/кг) и железо (0,17 мг/кг).

Количественные характеристики пищевой, энергетической и биологической ценности сухой гранулированной молочной сыворотки установлены экспериментально.

Гранулированная молочная сыворотка, выработанная по предложенной технологии, характеризуется полноценными свойствами и составом (аминокислотным, витаминным, минеральным), обладает пищевой, биологической и энергетической ценностью, поэтому может быть отнесена к продуктам функционального назначения, которые в последнее время востребованы потребительским рынком.

Сухая гранулированная молочная сыворотка после восстановления может использоваться, например, в качестве среды для питания и развития разнообразной микрофлоры. Для этого она содержит все необходимые вещества и микроэлементы.

Сухой гранулят молочной сыворотки может храниться достаточно долго, сохраняя при этом надлежащее качество и безопасность потребления в пищевых целях. Однако необходимо строго соблюдать установленные диапазоны условий хранения – температуры и влажности. Их нарушение может привести к

необратимым изменениям свойств продукта, вызвать его порчу. Исследования на сохранность сухого гранулята молочной сыворотки показали, что возможная длительность хранения выше установленного коэффициента резерва.

Сухой сывороточный гранулят успешно хранится в два раза дольше установленного срока хранения. Исследования свойств и характеристик сухого сывороточного гранулята проводились после его хранения при различных температурах. Срок годности составил два года.

Упаковка сухого сывороточного гранулята представляет собой крафт-пакет с полиэтиленовым вкладышем и соответствует ГОСТ 10354-82. Вес упаковки (20 ± 2) кг.

Для проведения исследований на сохраняемость в лабораторных условиях выбрана также упаковка в виде крафт-пакета с полиэтиленовым вкладышем, но меньшего размера (200×200) мм, в которой содержалось 600–650 г гранулята.

Исследования сроков хранения продукта проводились в течение 24 месяцев. Сухая гранулированная молочная сыворотка хранилась при различных температурах: -18°C ; $(+4 - +6)^{\circ}\text{C}$; $+20^{\circ}\text{C}$. При этом органолептические показатели гранулята сохранились на прежнем уровне. Выявлено изменение консистенции гранулята, который хранился при $+20^{\circ}\text{C}$. Продукт стал более склонен к комкованию вследствие повышения его гигроскопичности.

Проведены исследования свойств и характеристик сухой гранулированной молочной сыворотки после ее хранения в термостате при температуре $+37^{\circ}\text{C}$ в течение трех месяцев. Установлены значительные изменения консистенции и внешнего вида. Гранулят приобрел более желтый оттенок по сравнению с другими образцами, имел вид спрессованной массы, которая легко подвержена измельчению при незначительных механических воздействиях. Запах гранулята стал более интенсивным, появились ноты карамельного запаха. Вкус сохранился. Посторонних запахов и привкусов не обнаружено.

Следовательно, можно говорить о том, что значительное повышение температур в период хранения способствует возникновению интенсивных химических и физических изменений продукта.

В сухой гранулированной молочной сыворотке возможна реакция меланоидинообразования, которая вызывает посторонний запах продукта, а также приводит к изменению его окраса.

Консистенция сухого гранулята молочной сыворотки меняется за счет перераспределения влаги в продукте, вызванного кристаллизацией лактозы.

Стоит отметить, что излишнее увлажнение гранул продукта в процессе его гранулирования и окатывания значительно снижает его качество, вызывая необратимые изменения.

В таблице 4.9 представлены значения влажности сухого гранулята молочной сыворотки, установленные в процессе его хранения в различных условиях. Установлено, что температурный и влажностный режимы оказывают существенное влияние на степень поглощения влаги продуктом.

Таблица 4.9 – Зависимость влажности сухого гранулята молочной сыворотки от условий хранения

Срок хранения, месяцев	Влажность (%) при температуре (t) и относительной влажности воздуха (W)					
	t = -18°C, W = 85%		t = +4..+6°C, W = 55%	t = +18..+20°C, W = 80%		t = +37°C, W = 28%
	Лабор. упаковка	Произв. упаковка		Лабор. упаковка	Произв. упаковка	
-	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
3	-	-	-	-	-	2,62
6	2,33	-	2,71	3,33	-	2,27
12	2,68	-	3,22	3,85	-	-
18	2,99	-	3,24	4,05	-	-
24	3,16	2,6	3,33	4,5	3,1	-

Низкие температуры хранения небольшого объема сухого гранулята молочной сыворотки способствуют незначительному повышению влажности продукта, в производственной упаковке влажность остается постоянной. Пребывание сухого гранулята молочной сыворотки в холодильной камере на протяжении 24 месяцев при (+4 – +6)°C и влажности 55% вызвало увеличение влажности продукта на 0,83%.

Также наблюдалось незначительное увеличение влажности гранулята (не более 2%) при его хранении в нормальных условиях при 20°C и влажности 80% в течение 24 месяцев.

Указанные изменения влажности зафиксированы для образцов небольшой массы 600 г, помещенных в мелкую упаковку (200×200 мм). Удельная поверхность упаковки составила 0,67 м²/кг.

Использование производственной упаковки более надежно защищает продукт от воздействий внешней среды и препятствует каким бы то ни было изменениям его влажности. При этом удельная поверхность производственной упаковки составляет 0,029 м²/кг. Так, в процессе хранения образца сухой гранулированной молочной сыворотки массой 20 кг при (+18 – +20)⁰ С и относительной влажности воздуха 80% изменений влажности не наблюдается. Хранение гранулята молочной сыворотки в течение 24 месяцев также не вызывает никаких изменений влажности продукта.

Таким образом, эмпирически установлена взаимосвязь влагопоглощающей способности сухого гранулята молочной сыворотки и удельной поверхности исследуемого образца продукта.

Динамика показателей микробной порчи (дрожжи и плесени, патогенные микроорганизмы, в т.ч. сальмонеллы) показана в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Микробиологическая обсемененность сухого гранулята молочной сыворотки

Показатель	Содержание микрофлоры, КОЕ/г	
	до хранения	после хранения
Патогенная микрофлора, в т.ч. сальмонеллы	не установлено (в 25 г гранулята)	
Бактерии группы кишечных палочек	не установлено	

Исследуемые образцы сухой гранулированной молочной сыворотки не содержат сторонние микроорганизмы, вызывающие ухудшение характеристик продукта и приводящие к его порче. Микробиологические показатели соответствуют «Гигиеническим требованиям к качеству и безопасности

продовольственного сырья и пищевых продуктов» (СанПиН № 2.3.2.560-96) (сухие молочные продукты).

В основе исследований сроков хранения сухого гранулята молочной сыворотки лежит методика, разработанная сотрудниками кафедры технологии молока и молочных продуктов Кемеровского технологического института пищевой промышленности. Данная методика предполагает определение органолептических характеристик продукта – консистенции, вкуса, запаха, внешнего вида, цвета. Хранение сухой гранулированной молочной сыворотки на протяжении 24 месяцев не вызвало каких-либо изменений органолептических характеристик. Исследуемые образцы оценены наивысшей оценкой.

Следовательно, можно заключить, что 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.

4.4 Исследование структурно-механических свойств гранулированной сыворотки и сывороткосодержащих композиций

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 и определяет стабильность процесса гранулирования.

Процесс гранулирования очень сложен для аналитического описания. Даже зная структурно-механические свойства каждого компонента смеси, трудно составить прогноз прочностных свойств получаемых гранул. Каждый этап процесса гранулирования – от зарождения рыхлого зерна гранулы до образования плотной гранулы – взаимодействие различных сил, определяемых плотностью

агрегативной структуры, свойствами и соотношением фаз дисперсных систем, подвергаемых гранулированию и окатыванию.

Гранулированию подвергалась сухая сыворотка, полученная в сушильном аппарате распылительного типа. Ее состав и свойства приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Состав и свойства сухой молочной сыворотки

Показатель	Характеристика показателя
Содержание сухого вещества, % по массе	95,6..98,2
в том числе:	
углеводы	68,4..71,5
белки	12,13..14,15
зола	4,39..6,38
жиры	1,0..1,5
Кислотность после восстановления до содержания сухого вещества 6,5% по массе, °Т	13..70
Растворимость, мл сырого остатка	0,1..0,3
Размер частиц, мкм	10..40
Внешний вид	порошок, состоящий из частиц сферической формы, состав полидисперсный

Предметом исследования являлись структурно-механические свойства сыворотки и композиций на ее основе, оказывающих значимое влияние на характер процесса гранулирования методом окатывания. К таким характеристикам можно отнести: угол естественного откоса (γ); насыпной вес (ρ); пластическая деформация; коэффициент внутреннего трения и внешнего трения по поверхностям. Значения насыпного веса и угла естественного откоса порошка молочной сыворотки и гранулированной смеси на ее основе представлены в таблице 4.12.

Сухие гранулы, изготовленные на основе молочной сыворотки, имеют больший насыпной вес и меньший угол естественного откоса, по сравнению с сывороточным порошком. Таким образом, гранулы более подвижны относительно друг друга.

Экспериментально определены сдвиговые и прочностные характеристики сухого гранулята молочной сыворотки. В первом случае использовался прибор,

имеющий бесконечную плоскость сдвига. Во втором случае применялся прибор, имеющий цилиндрическую ячейку. Значения сдвиговых и прочностных характеристик установлены при комнатной температуре и влажности сыворотки 3,7..4,0%.

Таблица 4.12 – Структурно-механические характеристики молочной сыворотки

Вид продукта	Насыпной вес, кг/м ³	Угол естественного откоса, градусы
Сухой порошок молочной сыворотки	730..860	40
Сухая гранулированная смесь на основе молочной сыворотки	1100..1500	33,5

Основными ограждающими поверхностями при проведении эксперимента выбраны сталь (шероховатость поверхности R_a10) и транспортерная резина. Сопротивления сдвигу – удельное τ , начальные τ_0 , всех ограждающих поверхностей $\tau_{огр}$ – возрастают с ростом нормального напряжения σ и предварительно напряженного состояния $\sigma_{упл}$. Экспериментальные значения сопротивлений и напряжений положены в основу расчета коэффициентов внешнего f_1 и внутреннего f трения, основанного на выражении:

$$f = \frac{\tau - \tau_0}{\sigma}, \quad (4.1)$$

Значения коэффициентов внутреннего трения превосходят значения коэффициентов внешнего трения. Большие значения коэффициентов трения гранул по внешним поверхностям рассчитаны для транспортерной резины, меньшие – для стали. Это обусловлено тем, что в случае использования резины в качестве ограждающей поверхности трение скольжения заменяется трением качения.

Получение гранул продукта окатыванием становится возможным лишь в области пластических деформаций. В связи с этим одним из важных показателей можно назвать пластическую прочность гранулированного продукта. Кривая, характеризующая зависимость пластической прочности сухой гранулированной

молочной сыворотки от влагосодержания, показана на рисунке 4.6. Эксперименты по изучению закономерностей гранулирования методом окатывания проводились на модельных образцах.

Эффективность процесса гранулирования влажных дисперсных материалов методом окатывания во многом определяется кинетикой капиллярного влагообмена. Данный процесс заключается в непрерывном уплотнении гранулы продукта и постепенном снижении интенсивности влагообмена, пропорциональном уплотнению комкуемого дисперсного материала. Экспериментально подтверждено, что капиллярная пропитка материала – очень медленный процесс вследствие повышения вязкости.

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 4.6.

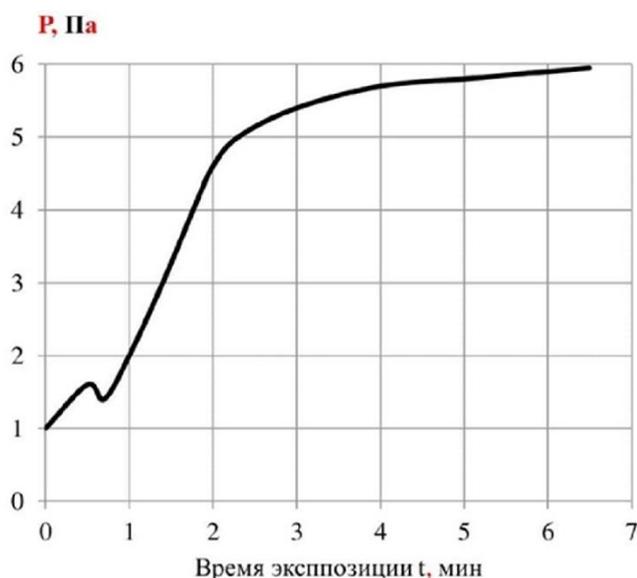


Рисунок 4.6 – Динамика значений пластической прочности увлажненной и виброуплотненной молочной сыворотки

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.

Таким образом, при исследовании пластической прочности установлено, что увеличение содержания сухого вещества молочной сыворотки более 75% по массе повышает способность продукта к образованию прочных твердых структур. Соотношение «твердое вещество – вода» в области «блокообразования», кроме того, присутствует так называемый «запас» сухого вещества, способного «связать» и удержать влагу. По этим причинам и наблюдается достаточно интенсивный процесс затвердевания увлажненной сухой молочной сыворотки.

Для сухого гранулята молочной сыворотки оптимальное значение влажности составляет 11%. Для сывороткосодержащих сухих гранулированных продуктов с добавлением плодово-ягодного сырья оптимальная влажность находится на отметке 13%. Таким образом, влажность при гранулировании молочной сыворотки ограничена узким интервалом от 10,5 до 11,5%.

Результаты экспериментальных исследований показали, что не только содержание жидкой фазы в растворимом порошке и его свойства определяют пластические характеристики продукта. Они во многом зависят от характера и особенностей связи твердой и жидкой фаз. В ходе эксперимента образцы сухих гранулированных смесей увлажнялись до значения влажности 2,5%. При этом наблюдалось снижение пластической вязкости образцов, поскольку влага на их поверхности производила смазывающий эффект. Это подтвердилось расчетными значениями коэффициента внутреннего трения. Повышение влажности до 11% привело к росту до максимума пластической прочности за счет капиллярно-адсорбционных сил связи. Увлажнение сывороточного порошка вызывает сначала его частичное, затем полное растворение, что приводит к снижению пластичности продукта.

Сложность процесса гранулирования дисперсных пищевых систем обусловлено многообразием форм взаимодействия твердой, жидкой и

газообразной фаз в их составе. Как правило, такие системы являются полидисперсными. Поэтому эффективность процесса гранулирования зависит от свойств твердой, жидкой и газообразной фаз, характера их взаимодействия и свойства комкуемости дисперсного материала под воздействием температур и внешних механических сил. И, несомненно, что свойства твердой фазы в составе полидисперсной пищевой системы имеют превалирующее значение. Дисперсная пищевая смесь на основе порошка молочной сыворотки и шрота плодово-ягодного сырья сформирована частицами разной геометрической формы и размеров. Эти особенности частиц твердой фазы обуславливают закономерности образования порового пространства гранул. В связи с этим необходимо всестороннее – научное и практическое – изучение удельной поверхности и среднего поверхностного диаметра частиц дисперсных сред, подвергаемых гранулированию.

Средний диаметр частиц ($d_{ср.пов.}$, мкм) определяется зависимостью:

$$d_{ср.пов.} = \frac{6}{S_{уд} * \rho_{ист}} \quad (4.2)$$

Эмпирические значения удельной поверхности и среднего поверхностного диаметра частиц приведены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 –Свойства дисперсных материалов

Наименование	$d_{ср.пов.}$, мкм	$S_{уд}$, м ² /кг	$\rho_{ист}$, кг/м ³
Крахмал картофельный	115,0	317,6	1640
Мука плодовая (из моркови)	38,6	1680,8	970
Мука плодовая (из ранетки)	41,2	1636,3	890
Мука ягодная (из аронии)	90,9	815,5	1080
Мука ягодная (из черники)	43,6	1360,2	830
Сахарная пудра	10,9	415,5	1580
Смесь для гранулята сухой молочной сыворотки с ягодным шротом	98,9	3951,6	1520
Сухая, деминерализованная сыворотка молочная (подсырная)	97,0	255,6	740
Сухое молоко (обезжиренное)	104,2	405,5	1420

Можно заключить, что дисперсная пищевая система, подвергаемая гранулированию методом окатывания, включает в свой состав структурный грубодисперсный каркаса, размер частиц которого может варьироваться от 50 до 250 мкм, и тонкодисперсную фракцию (мука на основе плодово-ягодного шрота, молочная сыворотка).

Частицы твердой фазы в составе полидисперсной пищевой системы обладают хорошо развитой поверхностью, что обуславливает высокую свободную энергию системы. По законам физики дисперсная система стремится снизить эту энергию, за счет чего и возникает свойство смачивания и агрегации частиц твердой фазы. Наибольшая поверхностная активность, обусловленная наибольшей поверхностью фазы, характерна для тонких коллоидных и полукolloидных фракций, даже в случае их относительно малого содержания.

Сухой продукт состоит из гранул, имеющих капиллярно-пористую структуру. Именно она и определяет свойства и характеристики сухого продукта. Пористость зависит от температурного и влажностного режимов процесса гранулирования. Структура гранулы продукта видоизменяется в процессе поглощения паров жидкой фазы, как правило, воды. При этом в гранулах происходят процессы растворения сахарной пудры, впитывания воды крахмалсодержащими компонентами, трансформация аморфного состояния молочного сахара в кристаллическое, переход белковых веществ в коллоидное состояние. Пористость гранул при этом претерпевает значительные изменения. Появляются новые поры, трещины, капилляры в результате кристаллизации молочного и других сахаров. Крахмалсодержащие компоненты и белковые соединения под воздействием влаги набухают, что приводит к частичному перекрыванию образовавшихся пор, трещин и капилляров. В связи с этим пористость твердых частиц быстрорастворимых напитков, содержащих наполнители растительного и животного происхождения, в том числе молочную сыворотку, значительно снижается по мере их увлажнения.

В основу изучения изменения пористости гранулированных продуктов – напитков и сыворотки – положен метод определения скорости проникновения

жидкой фазы в гранулы продукта без растворения ее компонентов. Пористость рассчитывается как соотношение объема жидкой среды (керосина), проникающей в гранулу продукта к объему гранулы:

$$\Pi_{ПОР} = \frac{V_2 - V_3}{V_1} \times 100\% \quad (4.3)$$

где: $\Pi_{ПОР}$ – показатель пористости состава молочной сыворотки и киселя;

V_1 – объем частицы гранулята, мм^3 ;

V_2 – исходный объем керосина, мм^3 ;

V_3 – конечный объем керосина (после полного распада гранулы), мм^3 .

Значения коэффициентов пористости различных гранулированных напитков имеют вид кривых (рисунке 4.7).

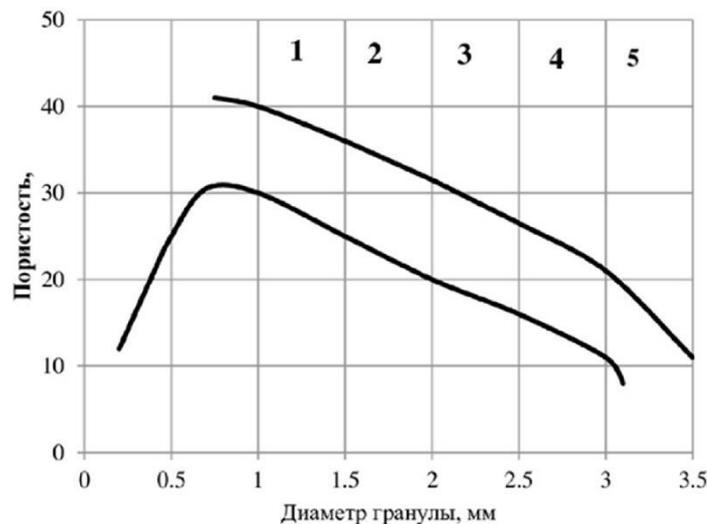


Рисунок 4.7 – Влияние гранулометрического состава молочной сыворотки и киселя на пористость гранулы

Результаты экспериментальных исследований показали, что увеличение диаметра гранул сыворотки и киселя приводит к снижению их пористости. На основании экспериментальных данных установлен оптимальный гранулометрический состав быстрорастворимого киселя. Размер гранул продукта необходимо поддерживать в диапазоне от 1 до 3 мм.

Исследовались прочностные характеристики сухих гранул молочной сыворотки с влажностью 4..4,6% и сырых с рабочей влажностью процесса

гранулирования 9,1..10%. Результаты, полученные методом раздавливания, представлены на рисунке 4.8.

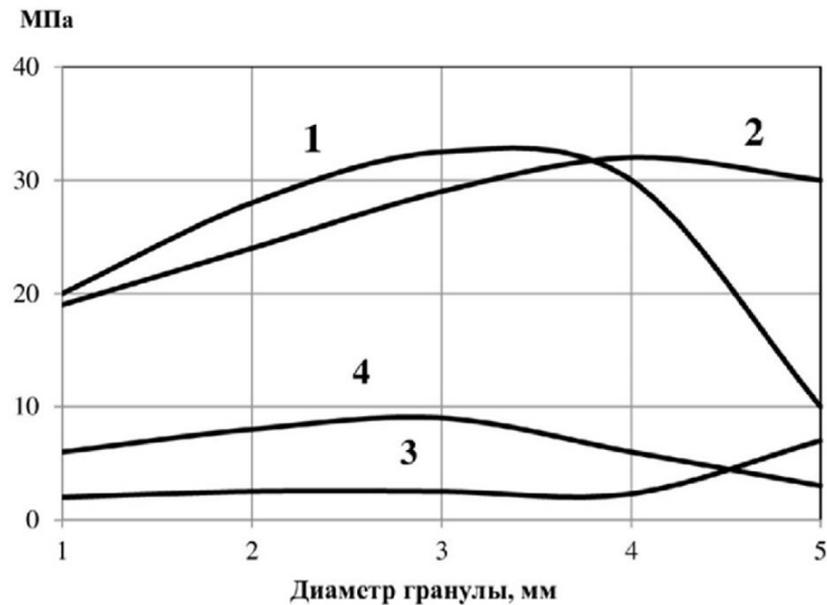


Рисунок 4.8 – Влияние диаметра гранулы на ее прочность на раздавливание

- 1 – сухая сывороточная гранула; 2 – сухая композиционная гранула;
3 – влажная сывороточная гранула; 4 – влажная композиционная гранула

Анализ экспериментальных кривых 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, что обусловлено ее тиксотропными

свойствами в состоянии промежуточной влажности. В данном случае оболочка уже затвердела, а сердцевина еще нет.

Прочность гранулы на раздавливание выражается через показатель прочности:

$$\Pi_p = \frac{P}{\pi R^3}, \quad (4.4)$$

где: Π_p – показатель прочности;

P – нагрузка, необходимая для раздавливания гранулы кг;

R – радиус гранулы, мм.

Механические характеристики гранул в составе готового продукта зависят от их геометрической формы, неоднородности и наличия дефектов пористой структуры, и, как следствие, имеют широкий разброс. Анализ зависимостей, представленных на рисунке 3.13, позволяет говорить о разбросе прочности гранул молочной сыворотки. Максимальное значение прочности имеют гранулы размером до 3,5 мм, что объясняется возможностью образования микротрещин, снижающих их механическую прочность.

Глава 5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОТОКА ПРОИЗВОДСТВА СЫВОРОТКОСОДЕРЖАЩИХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ

5.1 Синтез технологического потока производства сухих структурированных продуктов

Проведённый в предыдущей главе анализ процессов формования даёт основание к переходу к следующему этапу, а именно – созданию модели технологического потока.

Постулируемая модель, а также детализация её отдельных составляющих определяется свойствами разрабатываемого технологического потока. Таким образом, моделирование сложной комплексной системы, описывающей проектируемый технологический поток, разбивается на этап анализа и моделирования её отдельных подсистем, этап анализа функционирования таких подсистем и установление корреляционных зависимостей между ними [170,172].

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 [193].

Сегодняшний день ставит задачу по развитию малого бизнеса, т.е. небольших производств, при этом подразумевается обеспечение большого ассортимента выпускаемых продуктов, в том числе и пищевых.

Для проведения процессов получения гранулированных продуктов в цехах малой мощности, приближенных к сырьевой базе, используется самая разнообразная аппаратура, как применяемая в других отраслях промышленности, так и специальная, пригодная только для данного процесса. Несмотря на большую номенклатуру оборудования для организации таких производств, требования к нему (оборудованию) едины: экономичность при обеспечении максимальной

производительности при получении гранулированных напитков заданного качества с допустимыми затратами при нормальных экологических и социальных условиях эксплуатации.

Пищевая промышленность в зависимости от объема и ассортимента производимого продукта может быть ориентирована на выпуск больших объёмов фиксированного ассортимента продукции (крупнотоннажное производство), либо на выпуск разнообразной номенклатуры продукции с мобильно меняющимся ассортиментом (малотоннажное производство).

Объём выпуска, т.е. классификация по «тоннажности», не является единственным классификационным признаком. Важное значение имеет и такой классификационный фактор, как характер производства, его многоассортиментность. Среди основных признаков малотоннажного ассортиментного производства можно выделить разнообразный ассортимент выпускаемой продукции при достаточно частой его замене, разнообразие применяемого сырья, возможность производства продукции различными способами, а также различных видов продукции из одного и того же сырья. Но при этом, как и при любом единичном и мелкосерийном производстве, возникают сложности при организации производства, его структуры.

Построение технологических потоков, анализ их «логики» возможно только с учетом, как совокупности отдельных технологических процессов, так и их характеристик, увязанных с оборудованием, на котором выполняются эти процессы, а также взаимодействие этих процессов, их иерархичность внутри потока.

Большое значение, кроме взаимосвязей внутри потока, на качество выпускаемого продукта (формируемых гранул), его пищевую ценность, минералогический и витаминный состав имеют и внешние факторы, к которым относятся сырьё, его качество, а также и потребительский рынок, который формирует требования к рецептуре и стоимости выпускаемого продукта.

Предприятие (цех), выпускающее продукцию, должно иметь несколько технологических линий, в составе которых должно быть универсальное, легко

переналаживаемое на выпуск различной продукции, типовое оборудование, включая и оборудование для подготовки и обработки исходного сырья.

Среди множества методов, применяемых для исследования таких сложных технологических систем (потоков), особенно эффективным методом, особенно на этапах предпроектного проектирования, является системный подход. Принимая во внимание несовершенство современных технологических потоков, такой системный подход (по В. А. Панфилову [219]) включает в себя исследование отдельных процессов в системе (микроисследования), а затем по полученным результатам в рамках отдельного аппарата или машины – макро-исследования. Несвершенство современных технологических потоков характеризуется еще и тем фактором, что функционирование оборудования носит дискретный характер из-за вмешательства человека

В основе реализации системного анализа процессов производства лежит модульный принцип. При реализации модульного принципа сложный технологический процесс рассматривается как совокупность модулей со своей физико-химической основой. Модули, объединяясь в различных сочетаниях, образуют, в свою очередь, технологический поток – совокупность разнообразных технологических процессов.

В связи с неодинаковой плотностью технологического потока вследствие нерационального расположения отдельного оборудования, либо несовершенства технологической линии на некоторых стадиях производства образуется незавершенная продукция, которая складывается в ожидании следующей операции. Отсюда в составе технологического потока необходимо предусматриваются специальные «накопители», а также устройства для ориентации обрабатываемого продукта.

Принцип модульности заключается в разработке отдельных независимых подсистем сложной технологической системы, что значительно сокращает время и затраты труда и в конечном итоге, имея набор различных модулей, сформировать сложный технологический поток.

На начальном этапе проектирования технологического потока производится отыскание аналогичных технологических процессов, которые могли решить вполне определенную аналогичную задачу. При отсутствии унифицированных процессов, подходящих по своим параметрам для осуществления поставленных целей одним из возможных, а иногда и единственным, путем является синтез технологических процессов. При этом используются типовые процессы, или методом синтеза с прототипом [240]. Выбор типового технологического процесса производится исходя из рациональности применения, примерно одинаковым содержанием и последовательностью осуществления технологических операций для определенных изделий или материалов, обладающих общими признаками. Наибольшая сложность проектирования технологического потока будет в том случае, когда отсутствует прототип.

На следующем этапе производится моделирование технологических потоков. При этом модель такой сложной системы, причем при разных уровнях иерархичности, будет формироваться как коллаборация более простых модулей; в этом проявляется принцип системности.

Моделирование представляется как взаимодействие подсистем на разных уровнях взаимодействия. При этом за счет составления графиков взаимодействия или расписания функционирования подсистем последняя (последние) приобретают новые возможности, отсутствующие у первоначальных модулей.

На рисунках 5.1–5.4 показаны примеры таких схем, разработанных с учетом действующих аналогичных технологий производства сухих порошкообразных и жидких концентратов соков [20, 31, 35, 39, 81, 84, 95, 120, 135, 194, 196, 222, 225, 226, 234, 245, 273, 259, 316, 348]. Общими в них являются режимно-технологические параметры для подсистем (таблица 5.1).

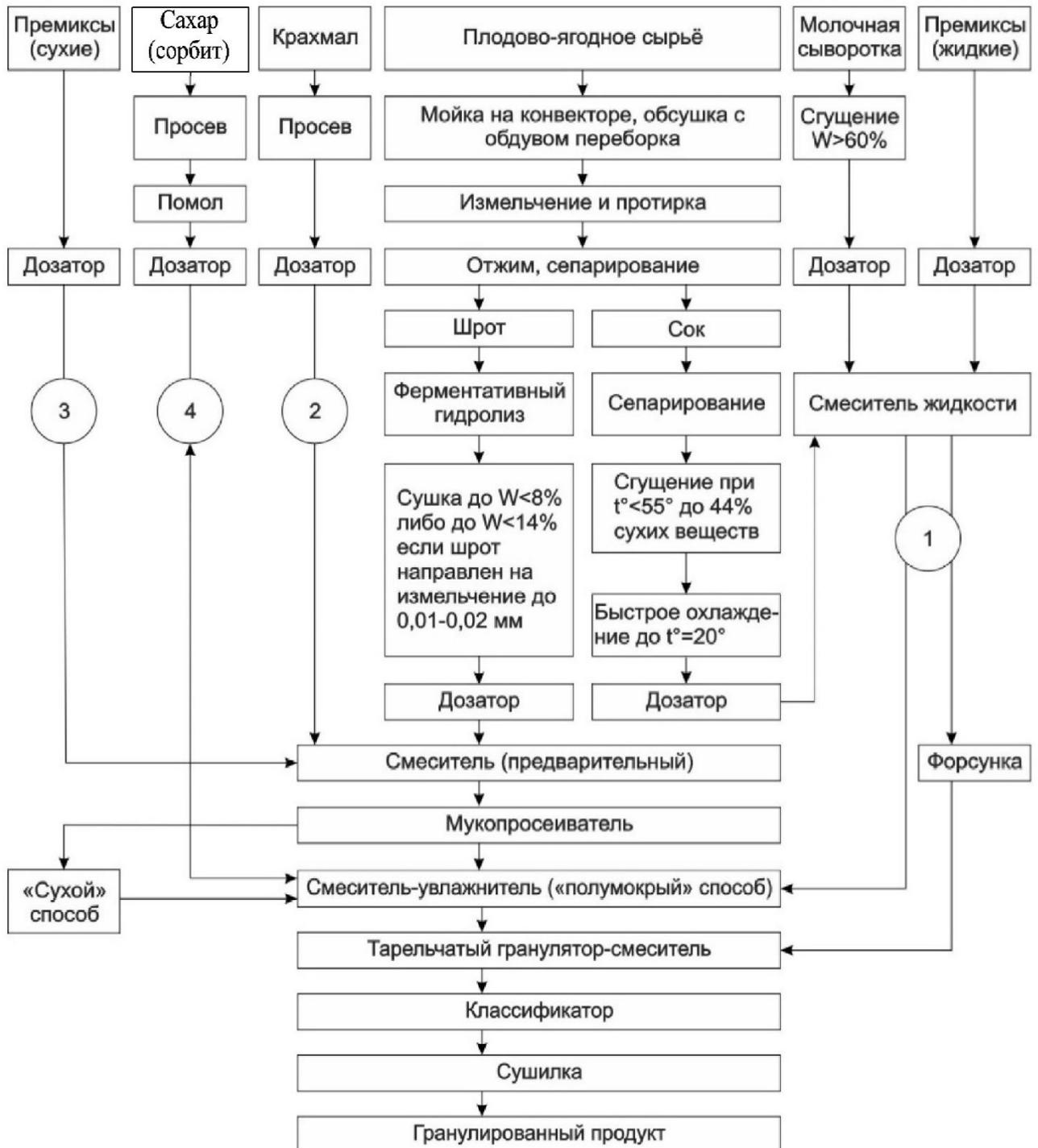


Рисунок 5.1 – Технологическая схема производства
 плодово-ягодного киселя с добавлением молочной сыворотки

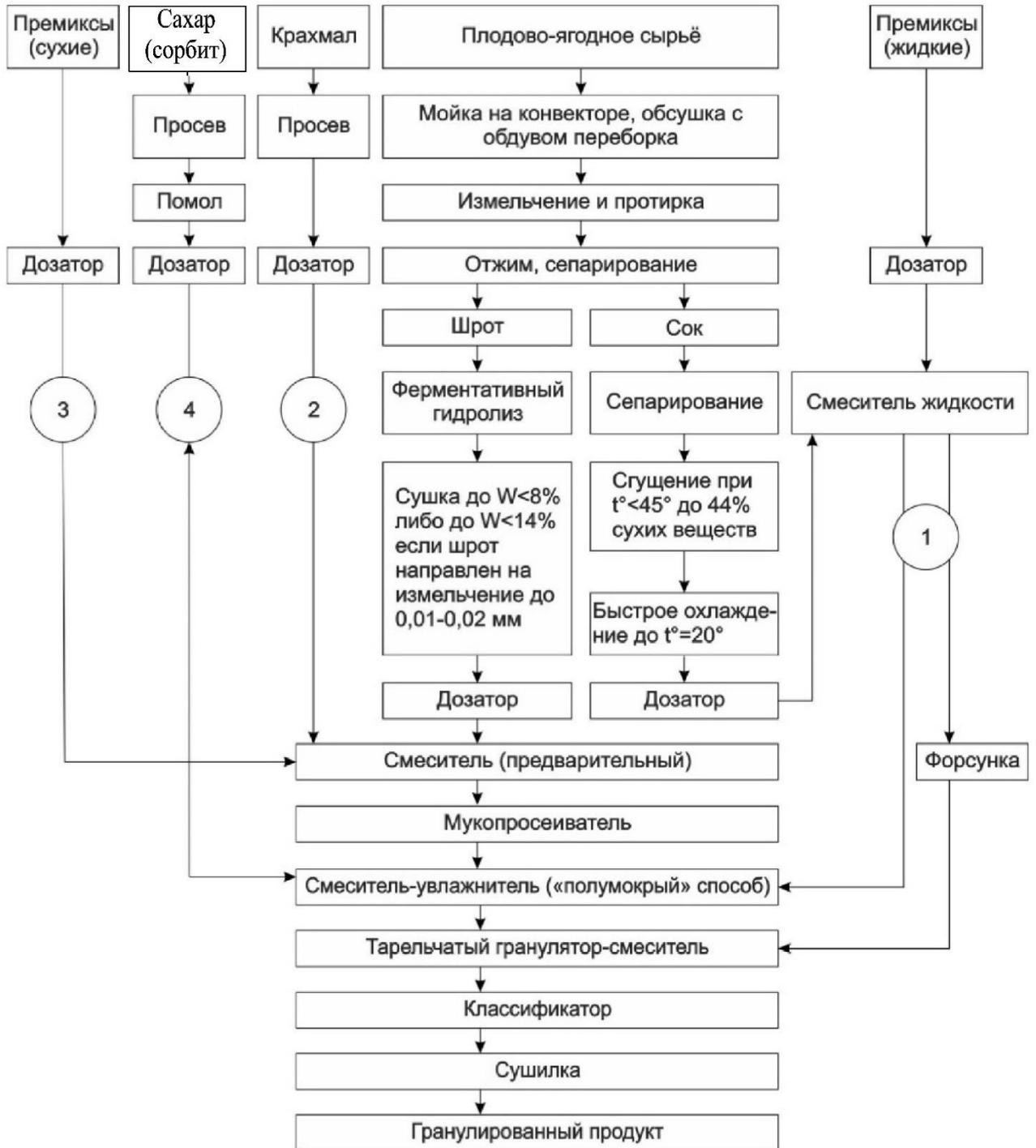


Рисунок 5.2 – Технологическая схема производства
фруктово-ягодного киселя

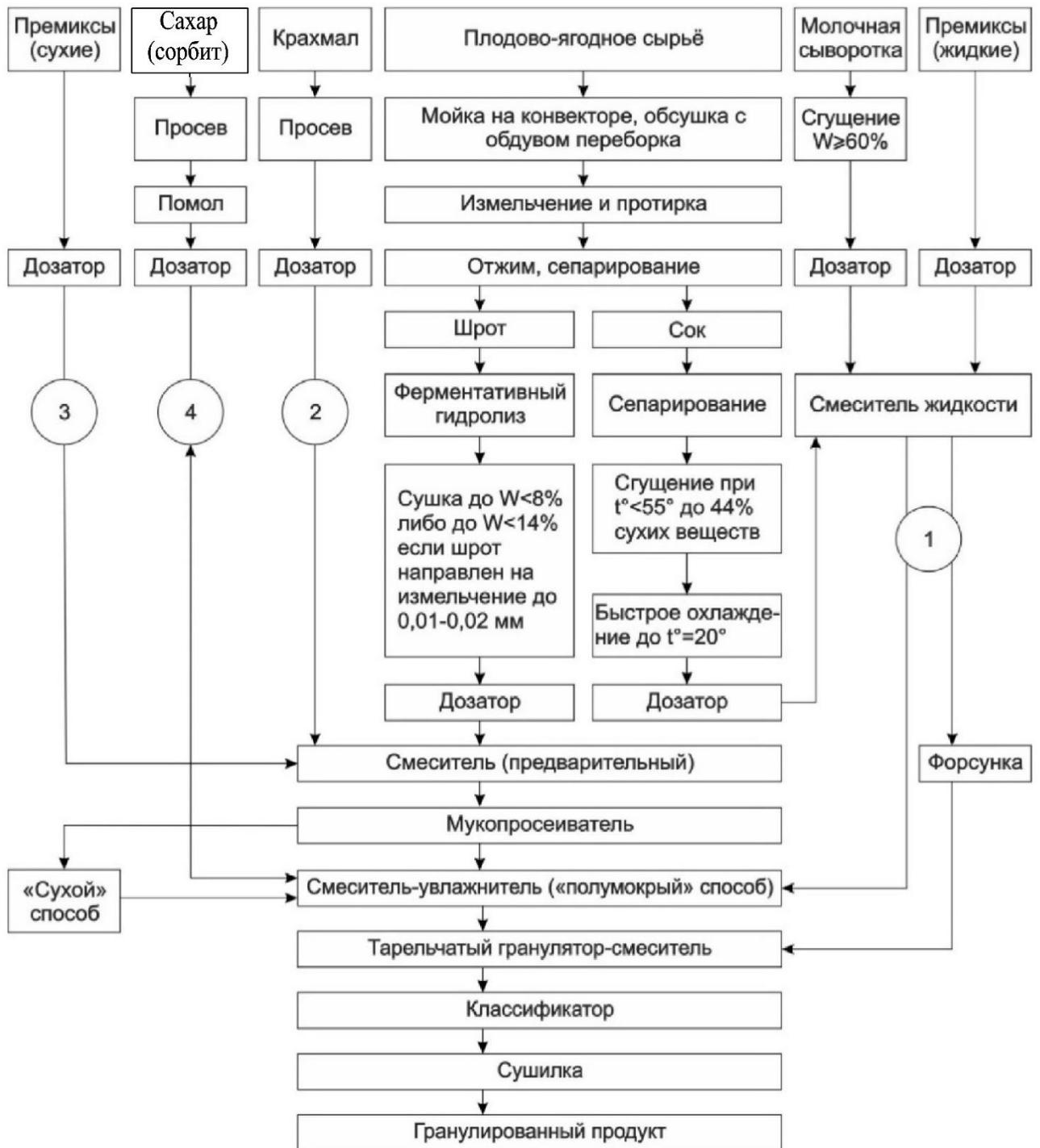


Рисунок 5.3 – Технологическая схема безотходного производства сухого плодово-ягодного киселя с добавлением молочной сыворотки и жидкого концентрированного неосветленного сока

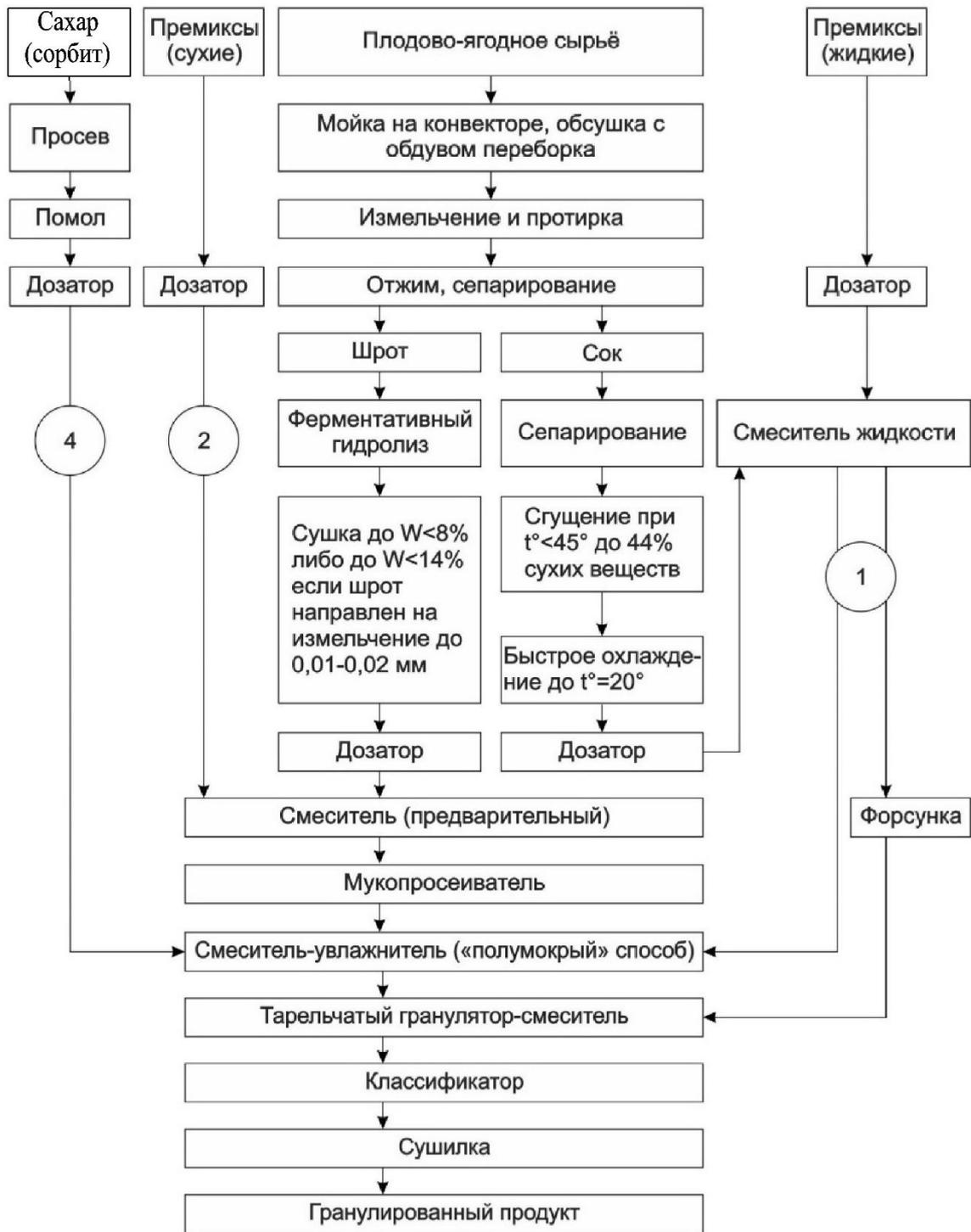


Рисунок 5.4 – Технологическая схема производства сухого гранулированного быстрорастворимого фруктово-ягодного сока

Таблица 5.1 – Физико-химические и качественные параметры технологического потока производства быстрорастворимых гранулированных продуктов

Обозначение подсистемы	Наименование подсистемы	Коэффициент весомости, <i>m</i>	Выходные параметры	
			Наименование параметров и ед. измерения	Значение на выходе с допуском
1	2	3	4	5
А	Подсистема инспектирования сырья	0,5	Содержание примесей, %	0,4–0,5
		0,5	Температура воды, °С	10–11
В	Подсистема подготовки и хранения сырья	<u>0,3</u> –	Температура сушки ягоды, °С	<u>50–55</u> –
		<u>0,35</u> –	Содержание влаги в высушенной ягоде, %	<u>12–14</u> –
		<u>0,35</u> –	Содержание витамина С в высушенной ягоде, мг/100 г	<u>≥175,8</u> (<u>≥117,3</u>) –
В	Подсистема подготовки и хранения сырья	<u>1,0</u>	Температура хранения замороженной ягоды, °С	<u>–18,0</u> –(<u>–18,5</u>)
Е	Подсистема измельчения сырья и разделения его на составляющие	<u>1,0</u>	Выход сока, %	<u>55–58</u>
D	Подсистема подготовки сухой основы	<u>0,45</u> <u>0,15</u>	Температура сушки, °С	50–55
		<u>0,30</u>	Содержание влаги в высушенных выжимках, %	<u>12–14</u>
		<u>0,30</u>	Содержание витамина С в высушенных выжимках, мг/100 г	<u>≥21,0</u>
		<u>0,55</u> <u>0,25</u>	Содержание влаги в высушенном шроте, %	12–14

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4	5
С	Подсистема экстрагирования	0,20	Температура экстракции, °С	45–50
		0,40	Массовая доля сухих веществ в экстракте, %	$\geq 4,0$ $(\geq 3,6)$ $\geq 2,3$
		0,40	Содержание витамина С в экстракте, мг/100 г	$\geq 7,0$ $(\geq 4,7)$ $\geq 0,4$
F	Подсистема выпаривания	0,2	Температура выпаривания, °С	48–50
		0,2	Давление в вакуум-выпарном аппарате, кПа	$\leq 4,8$
		0,30	Массовая доля сухих веществ в концентрированном экстракте (смеси экстрактов), %	55–60
		0,30	Содержание витамина С в концентрированной композиции, мг/100	$\geq 83,0$ $(\geq 56,4)$
G	Подсистема формирования гранул	$\frac{=}{0,15}$	Массовая доля муки овсяной, %	$\frac{=}{50,0-}$
		$\frac{0,25}{0,2}$	Массовая доля концентрированного экстракта (смеси экстрактов), %	$\frac{33,0-}{33,3}$ 15,0– 15,2
		$\frac{0,25}{0,2}$	Массовая доля сыворотки сухой подсырной, %	$\frac{15,0-}{15,2}$ 6,0–6,1
		$\frac{0,1}{0,1}$	Массовая доля крахмала картофельного, %	$\frac{16,0-}{16,2}$ 3,0–3,1
		$\frac{0,1}{0,1}$	Массовая доля шрота, %	$\frac{4,69-}{4,74}$
		$\frac{0,15}{-}$	Массовая доля фруктозы, %	$\frac{31,0-}{31,3}$

1	2	3	4	5
G	Подсистема формирования гранул	$\overline{0,15}$	Массовая доля сахара, %	$\overline{24,0-24,2}$
		$\underline{0,15}$ –	Массовая доля «Свита», %	$\underline{0,31-0,32}$ –
		$\overline{0,1}$	Массовая доля премикса «Валетек-3», %	$\overline{0,33-0,34}$
J	Подсистема сушки и классификации гранул	0,25	Температура сушки, °C	50–55
		0,30	Содержание влаги в высушенных гранулах, %	$\frac{5-6}{8-9}$
		0,30	Содержание витамина С в гранулированном продукте, мг/100 г	$\geq 34,5$ $\geq 122,0$
J	Подсистема сушки и классификации	0,15	Время растворения гранул, с	$\frac{30-35}{35-40}$

Как видно из представленных рисунков, приведенные, по своей сути универсальные технологические схемы являются 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;
- технологический поток производства сухих гранулированных десертов может быть осуществлен при замене крахмала на желирующие добавки;
- исключив из линии плоды и ягоды и заменив молочную сыворотку молоком, получим технологический поток производства молочного киселя и так далее.

При проведении комплексного анализа осуществляемых (проектируемых) процессов, как сложных систем, необходимо ввести граничные условия. Например, при отсутствии границ процесс производства можно было бы рассматривать, начиная с первых операций получения сахара, крахмала и кончая транспортированием готовой продукции в магазины. Установление границ зависит от цели исследования. Проведение исследований в данной работе ограничено условиями технологии, существующей в данном пространственно-временном континууме.

Для иллюстрации вышесказанного на рисунках 5.5–5.10 приведены технологические потоки различных сухих инстантированных продуктов: киселя, сока, десерта и др. Анализируя схемы, отмечаем, что доминирующими подсистемами, имеющими вид разветвленных сходящихся потоков, на всех вышеприведенных схемах являются линии (участки) формирования – гранулирования готового продукта.

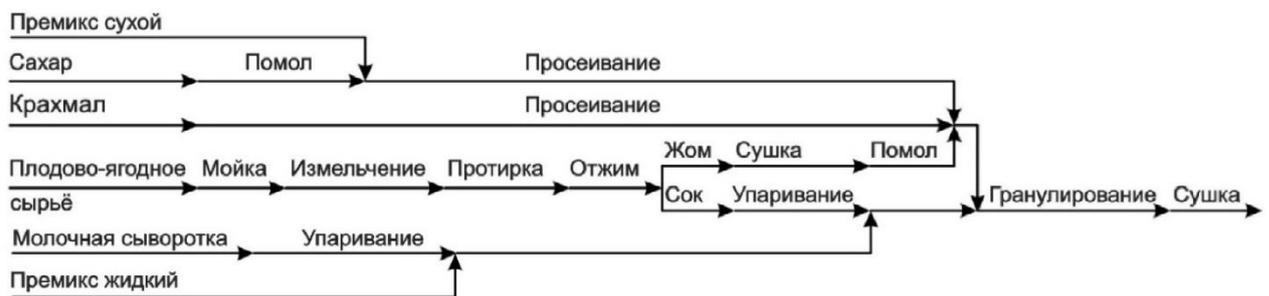


Рисунок 5.5 – Схема технологического потока производства быстрорастворимых гранулированных киселей с плодово-ягодно-сывороточной смесью

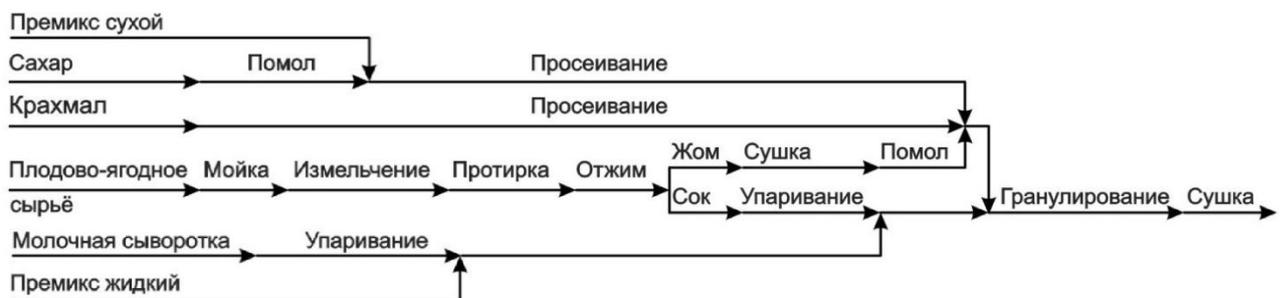


Рисунок 5.6 - Схема технологического потока производства быстрорастворимых гранулированных киселей с премиксами

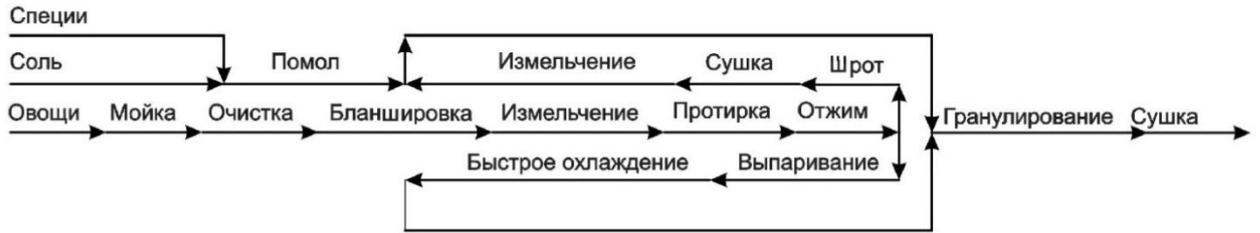


Рисунок 5.7 - Схема технологического потока производства гранулированных овощей быстрого приготовления

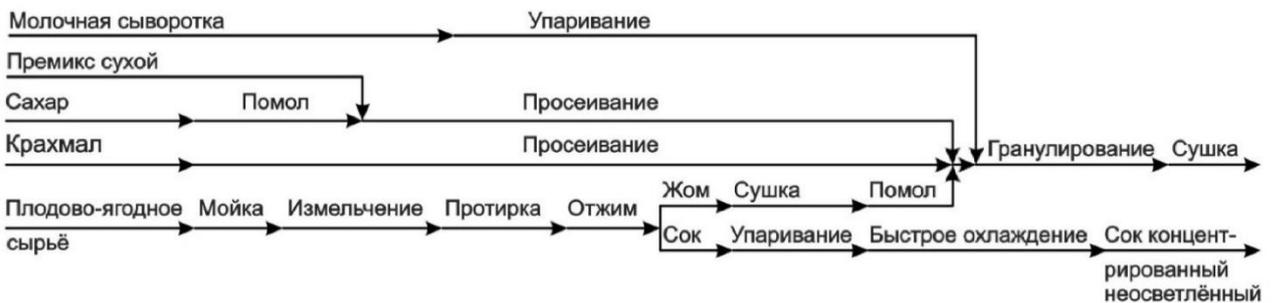


Рисунок 5.8 – Схема технологического потока производства быстрорастворимых гранулированных плодово-ягодных, обогащенных премиксами, киселей с молочной сывороткой



Рисунок 5.9 – Схема технологического потока производства быстрорастворимой гранулированной сыворотки

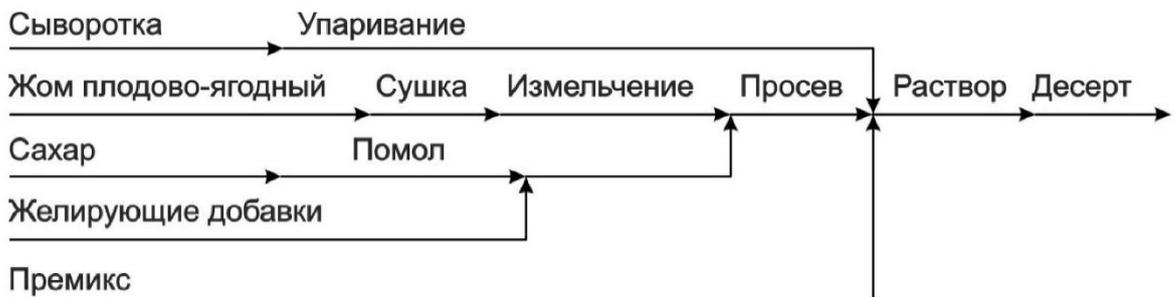


Рисунок 5.10 – Схема технологического потока производства сывороточно-ягодного десерта

Технологический поток является своеобразным преобразователем исходного сырья в кисель, оформленный в виде гранулы. Для повышения эффективности технологического потока необходимо знать его закономерности.

Задача заключается не только в том, чтобы, используя накопленный опыт промышленных предприятий по переработке сельскохозяйственной продукции, а также предприятий других отраслей (химической, цементной и др.), скомпоновать такую технологическую цепочку, но и определить инженерные решения для создаваемых технологических потоков производства гранулированных напитков, представляющих собой системы процессов. Вариативность состава и свойств исходного сырья и готового продукта определяет и сложность всей системы процессов.

Характер взаимосвязей оборудования, применяемого в технологических потоках, имеет сложное взаимовлияние, многофакторность; в них присутствуют одноконтурные обратные связи, увязывающие качество получаемой продукции с параметрами используемого оборудования. В комплекс таких взаимосвязей входит и нестабильность параметров качества исходного сырья.

Все машины и агрегаты, являющиеся отдельными элементами, функционирующими в составе технологического потока, взаимосвязаны между собой и оказывают друг на друга как прямое, так и косвенное воздействие. Для выявления таких воздействий необходимо проводить комплексные исследования в рамках технологического потока, позволяющие привести в систему, упорядочить взаимосвязи отдельных элементов, образующих единое целое, причем это целое не может быть представлено как сумма свойств таких элементов. Различие качества системы от качеств элементов, составляющих эту систему, объясняется взаимодействием элементов не в целом, а определенными свойствами. При этом система:

- имеет цель функционирования, которая достигается при решении одной или нескольких задач;
- имеет механизм управления процессом упорядочивания системы, то есть приведения её в соответствие с поставленными целями и задачами;

- имеет структуру, которая включает в себя ряд подсистем;
- при своём функционировании может изменять состояние параметров подсистем, причем структурный граф всей системы практически не меняется.

Отмеченные свойства систем в полной мере относятся к методам производства гранулированных напитков. Технологические возможности любого аппарата, входящего в технологическую линию (рисунки 5.5–5.10) могут существенным образом ограничивать технологические возможности других аппаратов в этой линии. Это характеризует технологический поток производства гранулированных напитков именно как систему. И конечно же линия упорядочивает связи между отдельными подсистемами, выполняя своё конечное предназначение – получение продукции с заданными параметрами качества

Таким образом, рассматривая эффективность работы технологических потоков и пути её повышения, необходимо рассматривать потоки именно как большую технологическую систему, и оптимизация работы одного аппарата (элемента) системы, вне его связи с другими аппаратами (элементами), может привести к работе всей линии не в оптимальных условиях.

Примем в качестве основы, что цели, достигаемые системой, являются первичным фактором, а структура системы, с помощью которой решаются эти цели, – вторичным фактором. Далее (а это так называемый функционально-структурный подход) выделим в общей системе отдельные структуры и их взаимодействие [240], Вся совокупность процессов является конгломератом типовых процессов: химических и физических. Условные обозначения таких процессов, так называемые процессоры, показаны в таблице 2.1.

Изобразим схематически технологические операции в операторном виде, применив условные обозначения процессов (рисунок 5.11).

Применяемые на схемах для соединения типовых процессов (операций) стрелки-связи являются графическим отображением материальных, энергетических и информационных потоков.

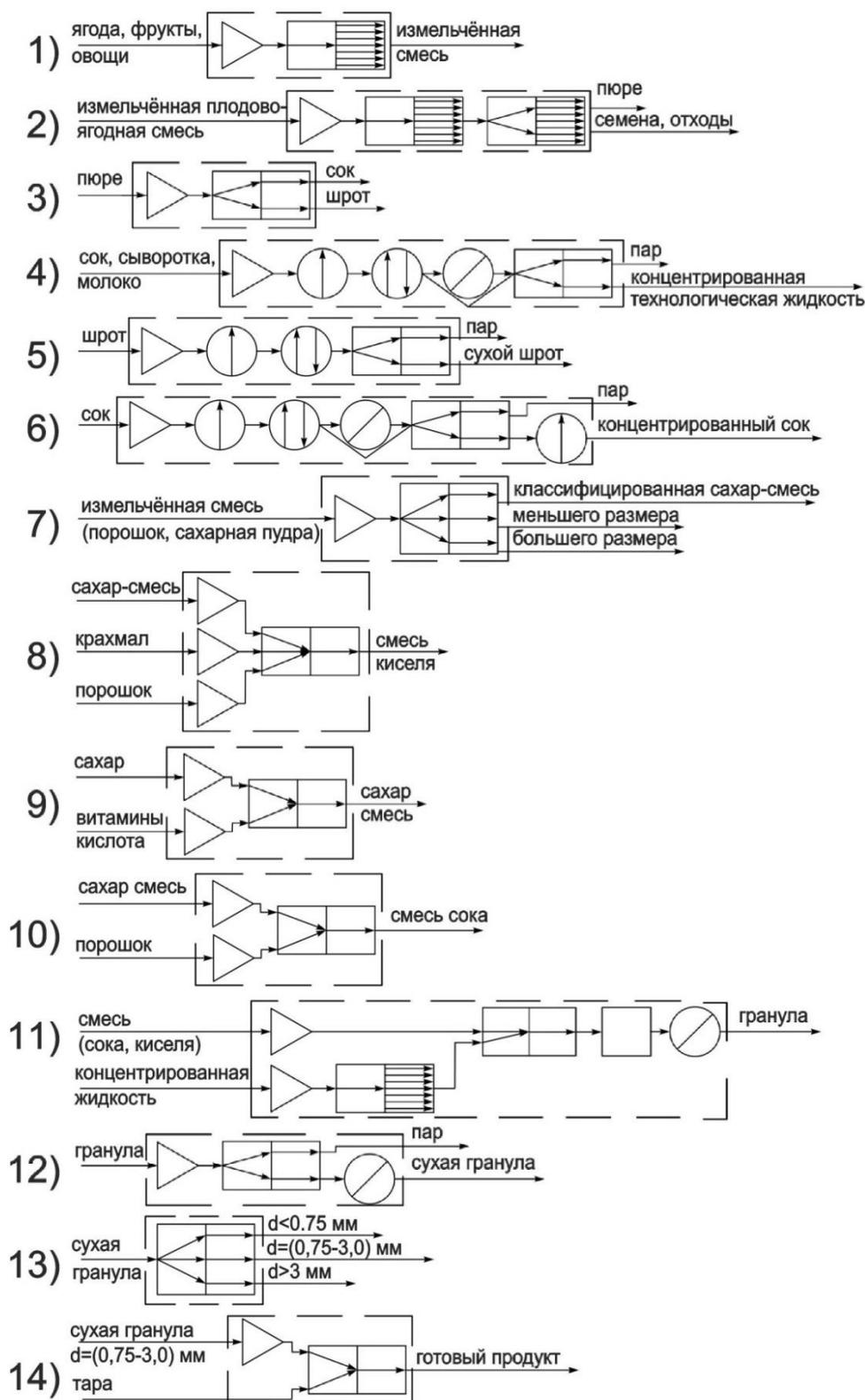


Рисунок .5.11 - Операторы технологических операций

1—оператор измельчения; 2—оператор протирки; 3—оператор разделения сока и шрота; 4—оператор упаривания жидкости; 5—оператор сушки шрота; 6—оператор концентрирования сока; 7—оператор – классификатор; 8, 9, 10—операторы – смесители; 11—оператор гранулирования; 12—оператор сушки гранул; 13—оператор – классификатор; 14—оператор упаковки готовой продукции

Взаимодействие структурных единиц, составляющих систему, создаёт свойства, характерные именно для этой системы. За такой элемент принята технологическая операция, т.к её расчленение приводит к «потере» именно технологических свойств и переходу на уровень физико-химических процессов.

Для описания явлений, происходящих в системе, применима терминология теории систем [219], получившая широкое распространение в химической и других отраслях промышленности. Теория систем даёт возможность более стройно выстроить логику изложения фактов, исключить внутренние противоречия и имеющиеся неопределенности, что присуще при проведении (особенно на начальных стадиях) современных исследований. Применение терминологии теории систем более полно и кратко описывают такие традиционные понятия, как технологический процесс, технологическая операция, участок, сырьё и др.

Кроме того, теория систем на данном этапе позволяет подготовить необходимые условия, которые позволили бы перестроить всю структуру исследования с целью количественной оценки входных и выходных параметров на разных уровнях технологических процессов.

Установив и проанализировав строение технологического потока, как сложной системы, взаимосвязи его отдельных элементов между собой и самих элементов, переходят к его синтезу. Сложившиеся традиционные методы затрудняют, а иногда и делают невозможным процесс синтеза технологических систем в связи с их многовариантностью и функциональной сложностью.

Обеспечение многоассортиментности выпускаемой продукции при условии определения оптимальности технологической и организационной структур системы, а также её аппаратное оформление является основной задачей синтеза. В настоящее время под синтезом сложных многовариантных систем понимают коллаборацию эвристических, интуитивных, т.е. содержательных, и алгоритмических, т.е. формальных, методов [220,240].

В понятие синтеза системы входит определение её структуры, алгоритма функционирования подсистем, состоящих или составленных из отдельных

операторов. При этом первичной целью проектируемой сложной системы является создание инстантированных пищевых продуктов, вторичной – создание структуры самой системы, которая формируется на основе универсального или специального оборудования.

Соотношение между универсальным, или многофункциональным, и специальным, или специализированным, оборудованием в большой степени оказывает влияние на качество конечного продукта. Это соотношение напрямую зависит от технологических возможностей создаваемой системы.

Принимая во внимание, что задача создания синтеза системы технологического потока ориентирована, в основном, на малые малотоннажные предприятия (хотя вполне применимы и для крупнотоннажных предприятий), основным типом оборудования будет многофункциональное быстро переналаживаемое на выпуск различной сельскохозяйственной продукции, оборудования. Загрузка такого оборудования должна быть по возможности круглосуточной и круглогодичной.

Для заданного сочетания функций, реализуемых данной системой и её наиболее оптимальной производительности, наиболее надежной и эффективной с точки зрения экономичности будет система с несложной структурой, включающей в себя возможно меньшее количество элементов.

При решении задачи синтеза технологического потока находятся наиболее рациональная технологическая организация потока. Одновременно рассматривается и организационно-производственное устройство системы; осуществляется комплектование либо проектирование технологического оборудования. Такой способ синтеза малотоннажных технологических потоков по переработке сельхозпродукции получил название структурно-параметрический способ [220,240]; он определяется организацией системы и зависит от номенклатуры выпускаемого продукта.

В данном случае наиболее рациональным будет решение, при котором технологические подсистемы будут применены как индивидуальные системы, которые позволяют использовать имеющееся оборудование, не модернизируя его.

При этом технологическая система (поток) создаётся путем использования процессов, использующих подобные технологические аппараты. Поэтому, используя на этапе синтеза технологических потоков критерий аналогии используемых на различных технологических стадиях подобных аппаратов, ставится задача оптимального сочетания (разбиения) технологических процессов. При этом на этапе параметрического синтеза производится оптимизация потока за счёт замены системы технологических процессов на систему машин и аппаратов;

Одной из особенностей малотоннажного производства является то обстоятельство, что преобладающими в таких производствах являются машины и аппараты, работающие в периодическом режиме (по данным [213] до 90% используемого оборудования)

Синтез системы – это не просто «механическое» ранжирование процессоров (подсистем) в технологическую цепь. Задачей синтеза является, используя закономерности установленных технологий производственных процессов и проанализировав их работу, выстраивание процессоров в единую технологическую линию с целью оптимизации режимов работы, либо предложить пути дальнейшего развития.

Для осуществления синтеза системы необходимо задаться исходными данными и областью их «существования». К таким данным могут относиться используемое сырьё, его тип и класс, технические условия и требования, предъявляемые к конечному продукту, программа выпуска продукции, сведения об оборудовании и др.

Процесс конструирования технологического потока производится за счёт перебора возможных вариантов. Однако, количество вариантов не может быть бесконечным. Ограничения множества вариантов связаны с видом выпускаемой продукции, её рецептурой и физико-химическим состоянием, а также имеющимся пакетом типовых технологических процессов или операций. Принимая в качестве основы рекомендации [214], процедура синтеза технологического потока начинается с разработки операторных моделей. Такие модели представляют собой

графическое отображение системы процессов, которые были выявлены при системном анализе технологических процессов.

Т.к. технология производства продукта может осуществляться различными способами и средствами, используемое машино-аппаратурное оборудование со временем изменяется. Операторные же модели практически неизменны, что позволяет создавать как типовые, так и оригинальные функционально-структурные модели технологических потоков.

Обеспечение (организационное, аппаратурное и технологическое) производства гранулированных пищевых концентратов с заданными параметрами качества и установленной номенклатуры при условии минимализации затрат является конечной целью синтеза малотоннажного производства с использованием способа периодической организации технологических процессов.

Оптимальной организацией многоассортиментного мелкосерийного производства гранулированных пищевых концентратов является блочно-модульная организация процесса [171,240]. Формирование технологического потока в ходе синтеза производится из нескольких имеющихся типовых подсистем (модулей), после чего для создаваемой технологической схемы (рисунки 5.1–5.4) производится формирование технологического потока. Принимая во внимание, что в проектируемом технологическом потоке доминирующим фактором является конечный продукт, цель синтеза может быть достигнута за счёт сочетания подсистем, имеющих различную организационную структуру.

Технологический поток, организованный в периодическом варианте, состоит из отдельных, осуществляемых последовательно технологических стадий. Подсистемы его функционируют в соответствии с определённой технологией, схемой. Поэтому оптимизация технологического потока периодического действия означает одновременную оптимизацию расписания работы подсистем и объёмов ёмкостей резервирования продукции на каждой стадии.

Определение технологической схемы является ключевой задачей на первом этапе проектирования сложного многоассортиментного производства гранулированных напитков. Такая технологическая схема должна включать в себя

все подсистемы, которые могут быть использованы при выпуске всей номенклатуры продукции, для которой и проектируется данная технологическая система; это позволяет сделать производство более универсальным. Здесь же приходится ответить на вопрос о совместимости отдельных подсистем, входящих в проектируемую систему. Например, если при помоле сахара и шрота не требуется дополнительной обработки оборудования, в то время как мойка выпарного оборудования и используемых ёмкостей между выпариванием сока и молочной сыворотки является обязательной операцией.

В связи с тем, что каждая подсистема, она же стадия процесса, обладает некоторой самостоятельностью, то её можно использовать в любой подсистеме или технологической схеме, технологический процесс, имеющий периодический характер, может иметь определенную вариативность технологических параметров, не выходящих, однако, за определенные границы. При синтезе мультिवариантных систем достигается оптимальность соответствия выбранного оборудования осуществляемым технологическим процессам и оптимизации структуры машино-аппаратурной системы.

Для выполнения формирования тела технологической системы нужно выполнить разделение технологических процессов на группы, положив в основу признак аппаратурной аналогии, определяемым в результате оценки по признакам, выбранными экспертами. Устанавливается сходство технологий и процессов, входящих в систему, после чего производится определение сходства технологических потоков производства гранулированных пищевых концентратов.

Разбиение мультिवариантной подсистемы на отдельные модули, т. е. использование модульного принципа, позволяет произвести независимую разработку подсистем, составляющих при синтезе технологический поток. Использование принципа модульности заметно упрощает процесс его (потока) «конструирования».

Формирование операторной модели технологического потока, используя модульный принцип, производится в следующей последовательности:

- выделяется цель (цели), с которой (ми) производится моделирование проектируемой системы;
- производится определение ключевых элементов системы, а также характеризующие её признаки;
- производится выстраивание технологическая приоритетность системы, т. е. формируется её иерархичность.

Разработка технологической схемы производства проводится на основании предпроектного анализа методов формирования гранул по аналогии с уже имеющимися процессами, которые могут быть приняты за прототип. В качестве прототипа принимается объект, производимый или разработанный в пищевой отрасли или в смежных областях. Функциональное назначение, а также условия применения должны быть аналогичны или подобны проектируемым подсистемам или её операторам. Если в результате предпроектного анализа обнаружено несколько аналогов, то, определив величину обобщённого комплексного показателя для каждого из них, производится выбор оптимального варианта. При отсутствии аналогов проектирование системы проводится исходя из показателей качества перспективных образцов. В качестве перспективных принимаются образцы, имеющие структуру и параметры наиболее вероятного варианта осуществления технологического процесса, полученного в результате анализа достижений и развития в данной отрасли (области технологии или техники).

Комплексная задача моделирования системы в целом на данном этапе разбивается на ряд частных задач. В этом случае производится моделирование подсистем, принимая её в качестве самостоятельной единицы со своими функциями исследования физико-химических явлений и процессов, но в то же время рассматривая её как подсистему, осуществляющую связи с другими подсистемами при формировании всего технологического потока.

Используя принцип аппаратурной аналогии и принимая во внимание классификатор технологических стадий (сушка и др.), производится формирование операторных модулей. В состав модуля включаются основные и вспомогательные операторы и процессоры. Модуль является самостоятельной

технологической системой, но в то же время должны быть предусмотрены взаимосвязи, объединяющие подсистемы в единую сложную систему – технологический поток. Такая агломерация осуществляется либо через промежуточные подсистемы (ёмкости), либо путём применения аппаратов непрерывного цикла изготовления продукции.

Начнем «конструирование» технологического потока с подсистемы А. Основным принципом при этом (как и на других этапах проектирования) должен быть принцип системности, т. е. нацеленности всего процесса на конечный продукт.

Подсистема А – упаковка изделий в тару. В накопитель 1 оператора II упаковочной машины (рисунок 5.12) поступают дозированные процессором 2 готовые откалиброванные гранулы. Далее они подаются в упаковочную зону 3. Одновременно в зону 3 поступает первичная тара, подающаяся из накопителя 4, которая уже ориентированна процессором 5 и направленная в загрузочную зону процессором 6, отвечающим за дозирование. Первичная упаковка, с находящимися в ней гранулами, подаются на другую часть машины (оператор I) и укладываются во вторичную упаковку.

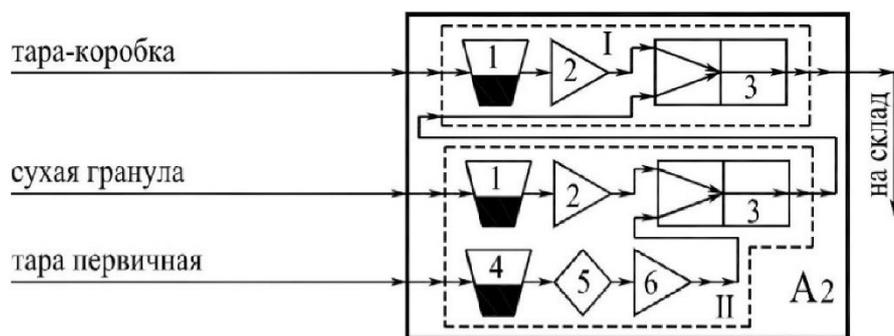


Рисунок 5.12 – Подсистема упаковки гранул

При упаковке пюре (рисунок 5.13) в операторе I появляется дополнительная резервирующая ёмкость для крышечек для закрывания баночек их дозирующего механизма (процессор 7) и ориентирующего устройства (процессор 8).

Подсистема затаривания в первичную и вторичную упаковку жидких продуктов – пюре (рисунок 5.13), сока (рисунок 5.14), сыворотки и т.п. – аналогична.

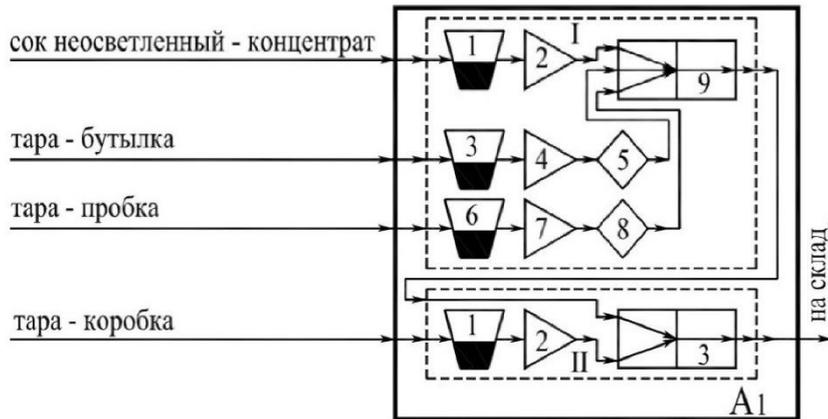


Рисунок 5.13 – Подсистема упаковки пюре

B – является подсистемой, происходит высушивание гранул с последующей их классификацией (рисунок 5.15). В состав подсистемы *B* входит два оператора, при этом оператор *I*, содержит процессор 1, осуществляющий повышение температуры гранул, а так же процессор 2, отвечающий за удаление влаги испарением из сформированных гранул.

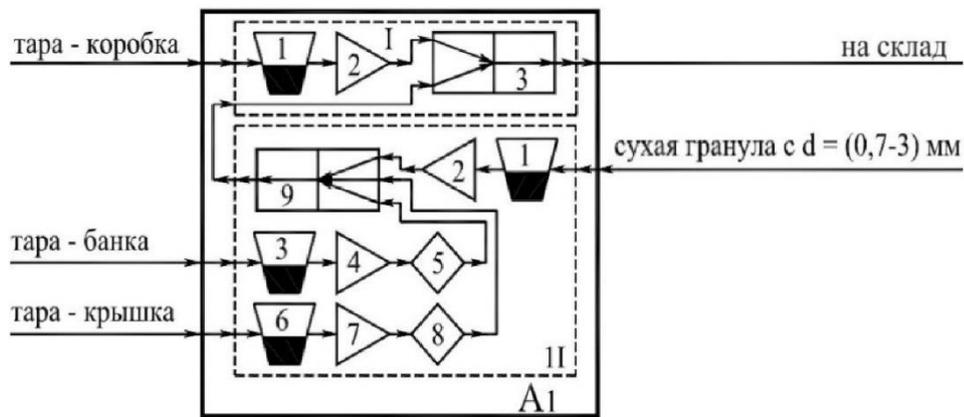


Рисунок 5.14 – Подсистема упаковки сока

В процессоре 3 изменяется агрегатное состояние системы: осуществляется её переход из состояния коагуляции в конденсационно-кристаллизационное состояние. В процессоре 4 (при изменении агрегатного состояния) гранула из трёхфазного состояния (твёрдая, жидкая и газообразная) переходит в двухфазную (твёрдая и газообразная),

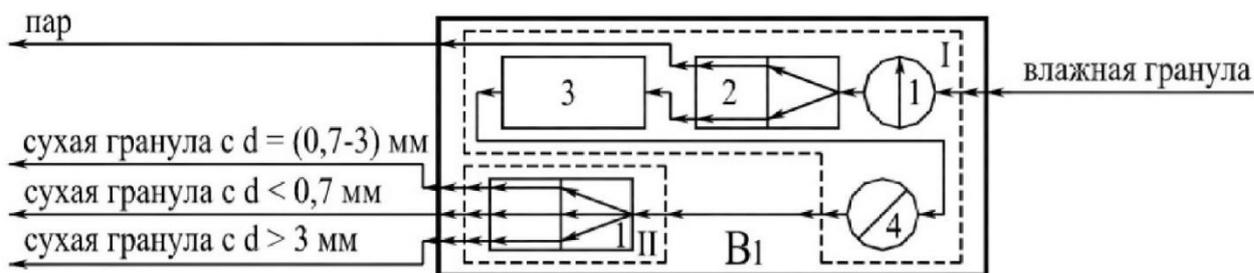


Рисунок 5.15 – Подсистема сушки и классификации гранул

Высушенные гранулы подвергаются классификации (калибруются). Если размеры высушенных гранул больше установленного размера, то они возвращаются на измельчение вместе с сахаром. При размере гранул менее допустимых размеров они повторно направляются в гранулятор, где происходит наращивание их размеров, после чего гранулы структурируются.

Подсистема С – формирования гранул (рисунок 5.16). В состав данной подсистемы формирования гранул, имеющих заданную структуру, входит оператор III, осуществляющий смешивание всех твердых составляющих, а в данном случае это полидисперсные порошки, в процессоре 6.

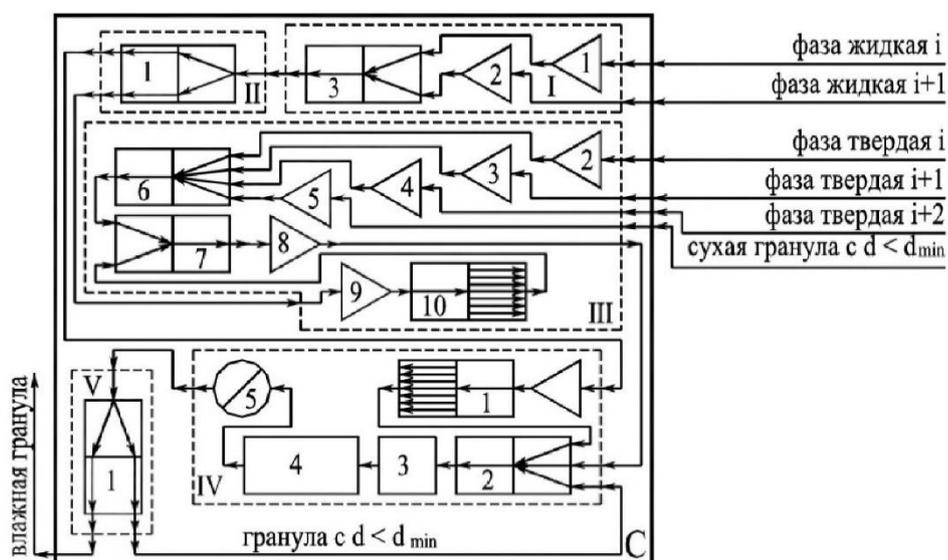


Рисунок 5.16 – Подсистема формирования гранул

Процентный состав этой смеси задается исходя из рецептуры, а определяют дозаторы 2, 3, 4, 5. В процессе перемешивания смеси в процессоре 7 может проводиться увлажнение смеси. Увлажнение смеси зависит от способа

гранулирования («сухой», «мокрый», «полумокрый»). В процессоре 9 происходит дозирование распылённой в процессоре 10 увлажненной жидкости. Распределение жидкости для увлажнения по потокам производится оператором II.

Перемешанная с распыленной в процессоре 1 жидкостью (это может быть вода, сок, молочная сыворотка) смесь, а также отклассифицированные оператором V гранулы подаются в процессор IV (гранулятор). Перемещаясь по тарели гранулятора, увлажнённая смесь окатывается и агломерируется. Одновременно происходит её структурирование, коагуляция (процессор 5), формообразование (процессор 3), происходящих за счет капиллярных и молекулярных сил (процессор 4).

«Сухой» способ увлажнения не требует; жидкость при таком способе в оператор III не подаётся.

D_1 – подсистема подготовки увлажняющей добавки. В данной подсистеме (рисунок 5.17) происходит подготовка добавки, представляющей собой увлажнённую смесь сахарной пудры, сухих премиксов, лимонной кислоты, ароматизаторов и т. п.

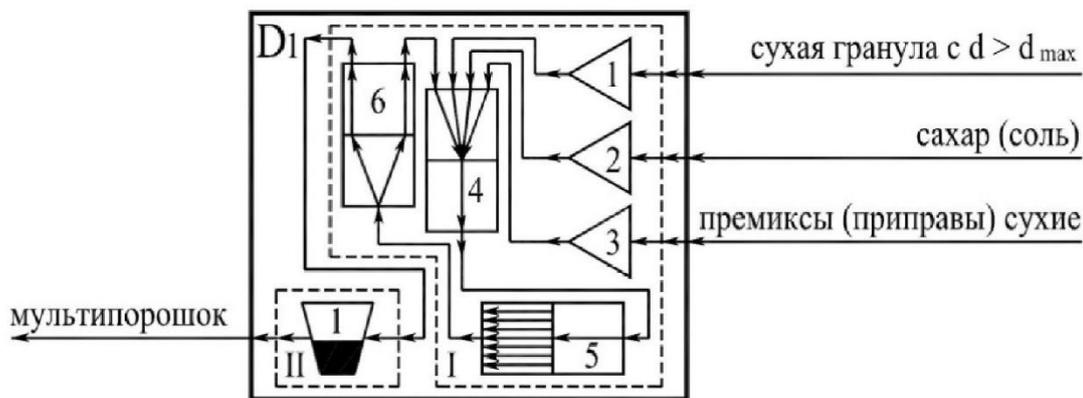


Рисунок 5.17 – Подсистема подготовки добавок

Сахар и соль поступают после мукопросеивателя, дозируются (процессоры 1, 2, 3), смешиваются с некондиционными гранулами, отбракованными при сушке, и премиксами, приправами и другими компонентами рецептуры (процессор 4). Полученная смесь измельчается процессором 5, просеивается на ситах (процессор 6) и резервируется оператором II.

Подсистема D_3 – подготовки крахмала. Подсистема подготовки крахмала (рисунок 5.18) состоит из дозирочного процессора 1, процессора разделителя (мукопросеивателя) 2 и резервирующей ёмкости в виде оператора II.

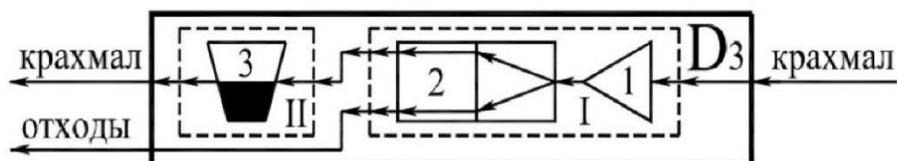


Рисунок 5.18 – Подсистема подготовки крахмала

Подсистема D_5 – подготовки плодово-ягодного порошка. Данная подсистема (рисунок 5.19) имеет в своём составе два оператора: состоящий из процессора дозирования 1, процессора 2 для обеспечения нагрева шрота до температуры влагоиспарения оператора сушки I и оператора удаления влаги II.

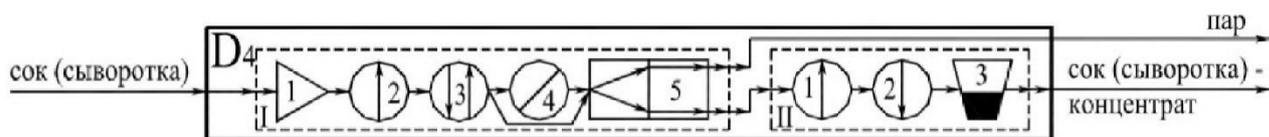


Рисунок 5.19. Подсистема подготовки порошка «фрукты – ягода»

Далее происходит смешивание сухого шрота и некондиционного порошка, который после классификации возвращается обратно из процессора 3, после чего происходит его измельчение в процессоре 2 до микродисперсного состояния.

Подсистема D_4 – подготовки жидкой фазы. Подсистема подготовки жидкой фазы (рисунок 5.20) является по существу системой выпаривания.

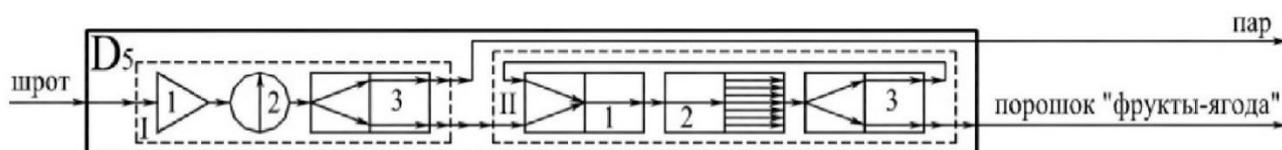


Рисунок 5.20. Подсистема выпаривания

Жидкость, подвергающаяся концентрированию в вакуум-выпарной установке, моделируемой оператором I, дозируется процессором 1, нагревается, после чего происходит её выпаривание (процессор 5) при обеспечении стабильной температуры (процессоры 2 и 3). Агрегатное состояние жидкости

после этого – насыщенный раствор (процессор 4). После выпарного аппарата концентрированный раствор (сок, сыворотка) пастеризуется (процессор 1), быстро, чтобы предотвратить кристаллизацию и выпадение хлопьев, охлаждается (процессор 2) и поступает в резервуар 3 оператора II

E – подсистема, обеспечивающая *измельчения исходного сырья* (рисунок 5.21). В этой же подсистеме происходит разделение сырья на жидкую и твёрдую фазы в виде сока и шрота. Плоды, ягода дозируются и загружаются в резервную ёмкость 2 оператора 1. После этого они поступают в оператор измельчения II, дозированными процессором 1 порциями, подвергаются диспергированию (процессор 2).

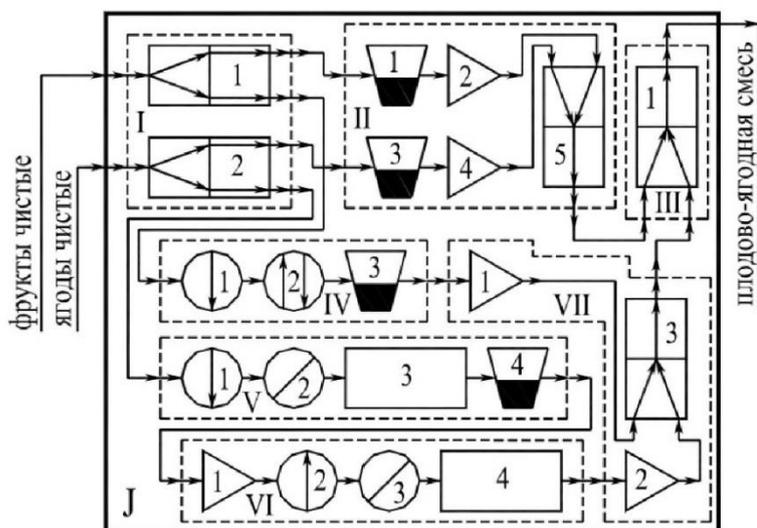


Рисунок 5.21. Подсистема измельчения сырья и его разделения на составляющие

Одновременно в процессоре 3 происходит отделение семян, семенных сумок, плодоножек и т.п., после чего происходит их удаление из подсистемы. Пюре, полученное таким образом, поступает на сепаратор (центрифугу), где происходит его разделение по фазам, твёрдую (шрот) и жидкую (сок), которые затем поступают в ёмкости для резервирования. Модель сепаратора (центрифуги) представлена оператором III.

J – подсистема *хранения и подачи сырья* (рисунок 5.22). Данная подсистема включает в себя подсистемы складирования овощей и фруктов, осуществляемая при обеспечении стабильной температуры.

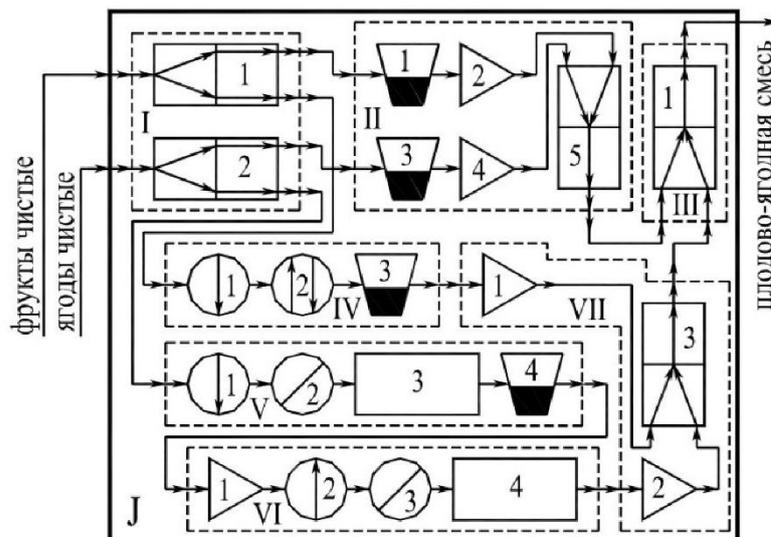


Рисунок 5.22. – Подсистема хранения и подачи сырья

Кроме того, сюда входит подсистема обеспечения замораживания ягод и плодов, их хранения в замороженном состоянии и дальнейшего размораживания и далее их дозированную выдачу на переработку после хранения или сразу после взвешивания. Фрукты и ягоды, поступающие на склад после мойки, инспектируются (оператор I), после чего часть ягоды и мягких плодов поступают на быструю заморозку (оператор V). В процессоре 1 они подвергаются охлаждению, в результате чего происходит изменение их агрегатного состояния – происходит затвердевание (процессор 2).

В результате этого происходит изменение физико-химической структуры (процессор 3) и плоды (ягоды) поступают на хранение в замороженном состоянии (процессор 4). При необходимости использования этой продукции, она поступает в оператор VI. В нём имеются: процессор дозирования 1; процессор нагревания 2; процессор изменения агрегатного состояния 3, вызванного размораживанием и способствующего этим протеканию сложных физико-химических процессов (процессор 4), связанных с переходом водой различных точек кристаллообразования. Плоды и ягоды, поступающие на хранение без заморозки, поступают в оператор IV, обеспечивающий стабильную пониженную температуру, обеспечиваемую процессорами 1 и 2. Оператор VII предназначен для подготовки композиций из вышеописанных плодов и ягод. Для этого они

дозировуются операторами 1, 2 и смешиваются оператором 3. Аналогичную функцию выполняет оператор II, на который сырьё в резервные ёмкости хранения (процессоры 1,3) поступает непосредственно после инспекции. Процессоры 2 и 4 при этом регулируют их количественное соотношение, поступающее на процессор 5. Выдача дозированной и учтённой продукции со склада обеспечивается оператором III.

Подсистема первичной подготовки сырья G (рисунок 5.23). На стадии первичной подготовки сырья осуществляется удаление веточек и других посторонних примесей из плодово-ягодного сырья, его сортировка, мойка и сушка. Инспекционная сортировка сырья, дозированного процессорами 1, 3, осуществляется процессорами 2, 4; отходы, смешиваясь процессором 5, удаляются из системы.

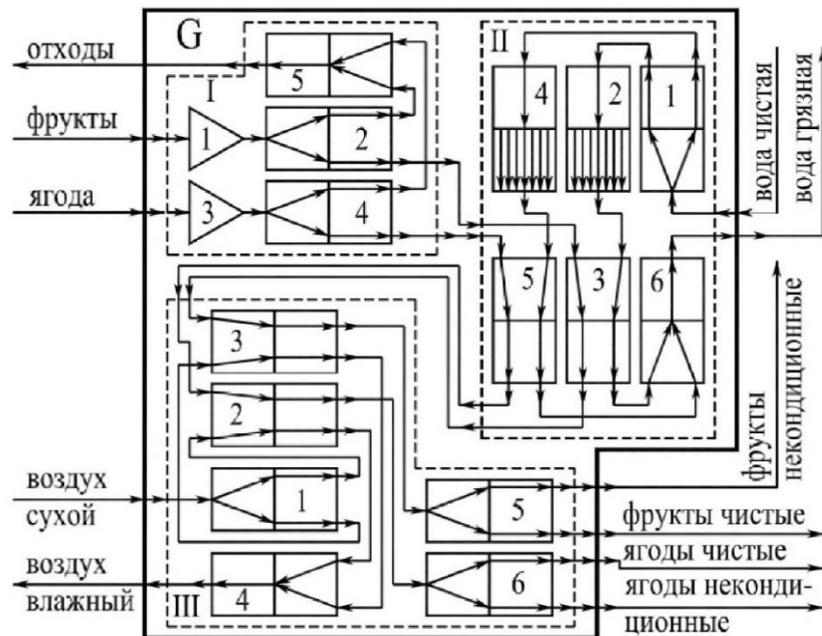


Рисунок 5.23. Подсистема первичной подготовки сырья

Далее продукция направляется на мойку (процессоры 5 и 3) под душем за счёт процессоров распыления 4, на которые чистая вода поступает с процессора 1. Грязная вода собирается процессором 6 и выводится в систему оборотного водоснабжения. Сырьё после мойки перемещается на стадию подсушки сухим воздухом (процессоры 2, 3), поступающего из приточных сопел, разделяющих его на потоки (процессор 1). Затем увлажнённый воздух посредством вытяжной

вентиляции (процессор 4) удаляется в атмосферу. По окончании предварительных стадий (мойки и последующего высушивания) ягоды и фрукты вновь поступают на инспекционную проверку (процессоры 5 и 6), в результате которой устраняется сырьё некондиционного качества.

Таким образом, управляемая часть технологической системы, а также взаимодействие таких подсистем, представленные здесь в виде операторных моделей, дают возможность осуществить моделирование всего технологического потока для изготовления практически любого продукта из плодово-ягодной и овощной продукции, включая и продукты быстрого приготовления. Пример модели таких систем представлен на рисунке 5.24.

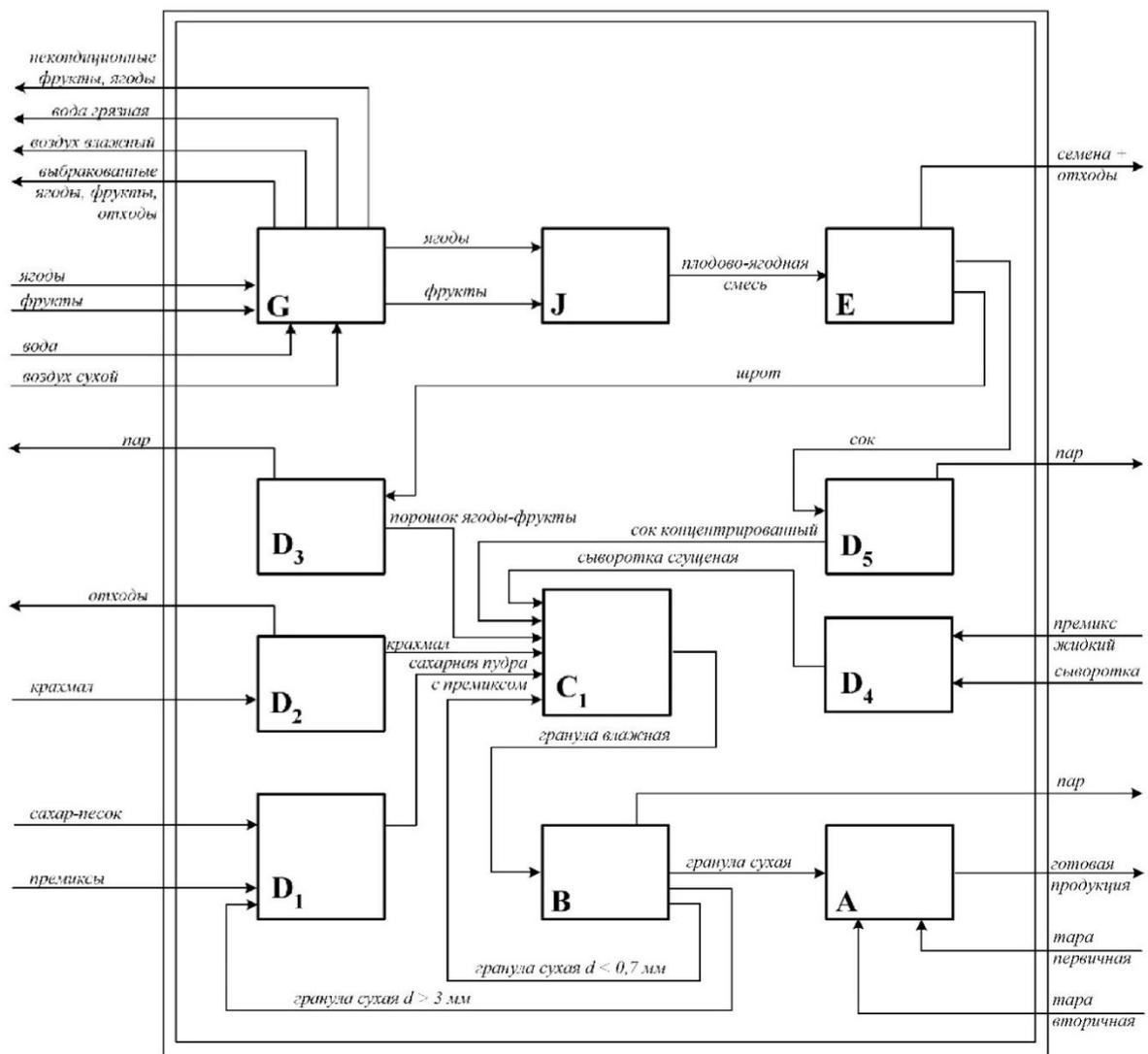


Рисунок 5.24 – Модель технологической системы производства киселей функционального назначения на молочной сыворотке

Свойства технологического потока, его функции являются способом функционирования процессов, входящих в технологический поток, во взаимодействии с внешней средой. Эти свойства определяют и функции отдельных подсистем, входящих в поток, и которые определяют функции отдельных элементов системы, т.е. технологические операции.

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 в подсистемах *B* и *C*, главных подсистемах потока. В подсистемах *B* и *C* происходит формирование параметров качества конечного продукта, что и является задачей исследований, проводимых в данной работе – разработка и реализация технологий создания быстрорастворимых гранулированных продуктов питания.

Выделим для дальнейших исследований исследование подсистем *B* и *C*. Такое выделение подсистем-«фаворитов» позволяет достаточно полно изучить процессы формообразования, происходящие во всей системе. На рисунке 5.25 показана операторная модель такой системы.

Изучение характера процессов, происходящих в подсистемах *B* и *C* и направленных на выпуск продукции заданного качества, проводилось в следующей последовательности:

- рассмотрение и изучение подсистем технологических процессов заменялось анализом и изучением подсистемы процессов через задаваемые параметры выпускаемой продукции;
- после определения параметров качества полученного продукта производилось, при необходимости, возвращение в подсистему процессов для внесения корректирующих изменений.

Такие возвраты из одной подсистемы в другую, которые при необходимости, определяемой качеством выпущенной продукции, могут выполняться неоднократно, дают возможность найти оптимальное решение для реализации технологического потока. При этом используются современные

машины и аппараты, а также могут выдаваться задания на проектирование перспективных моделей

Технологическая схема выпуска опытных партий продукции, осуществленной на ООО НПО «Здоровое питание» (г. Кемерово), представлена на рисунке 5.25.

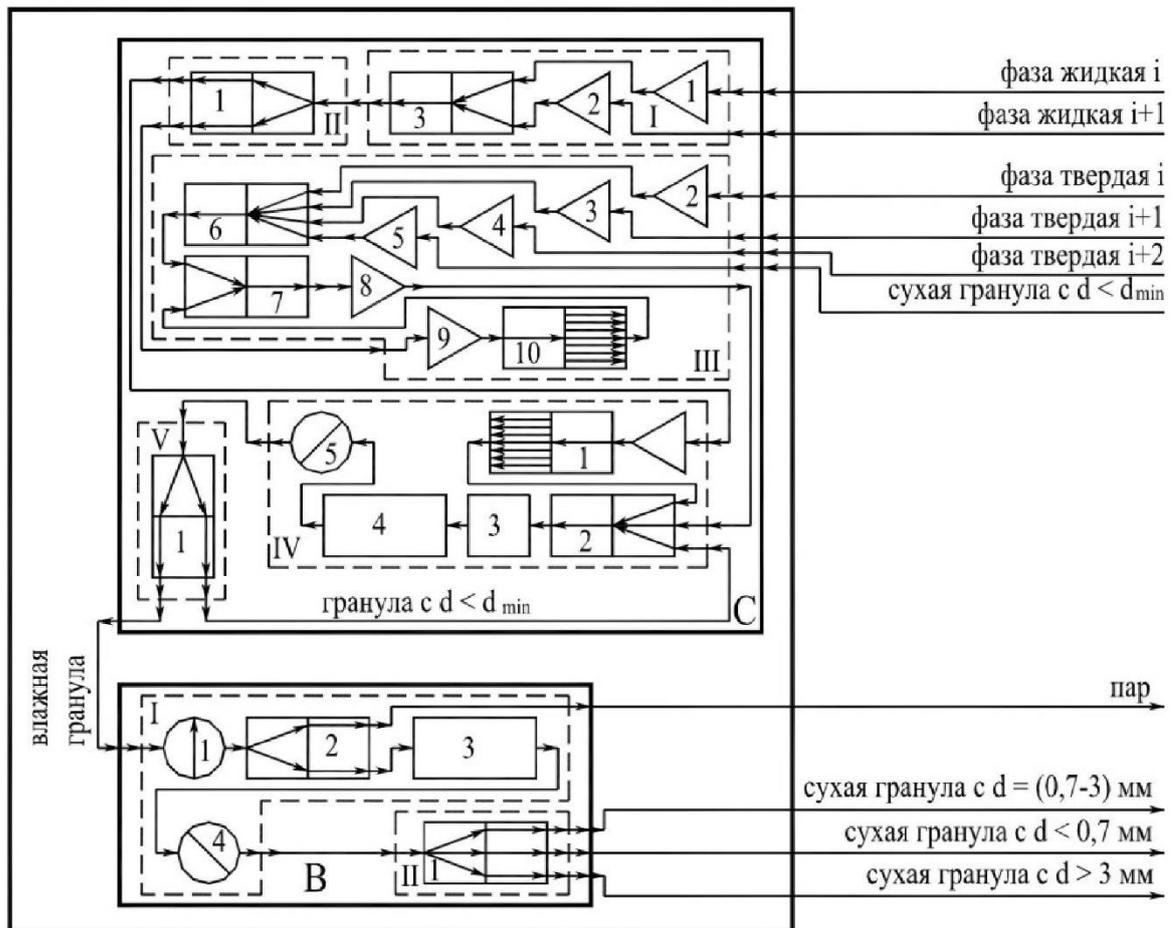


Рисунок 5.25 – Операторная модель системы формирования быстрорастворимых гранулированных напитков

В результате были определены контролируемые параметры качества технологического потока. Это:

- стабилизация процесса получения гранул необходимой формы и размеров в пределах установленных полей допусков;
- обеспечение на всех стадиях гранулообразования необходимой прочности гранул;
- обеспечение на всех этапах гранулообразования, особенно при транспортировке и сушке необходимой силы раздавливания гранулы;

– скорость растворения гранул, их растворимость, изменение вязкости; способность сохранять свои органолептические показатели в течение заданного промежутка времени.

Первые два параметра относятся к технологическим параметрам; их контроль осуществляется внутри технологического потока. Параметры три и четыре являются параметрами качества, по которым «диагностируется» весь технологический поток. Косвенно по этим параметрам контролируются и два первых параметра.

Таким образом при анализе и исследовании операторной модели технологического потока установлено, что управление процессом формирования параметров качества быстрорастворимых гранулированных напитков возможно только при пристальном изучении системы процессов в подсистемах «В» и «С».

5.2 Разработка математической модели процесса в подсистеме «С»

Для корректного создания математической модели технологических процессов (подсистем) необходимо иметь достаточно полный «банк» исходных данных, характерных для используемых систем (среды эксплуатации, конструктивных модулей, объектов отказов), а также определить, каким образом каждая из этих систем может повлиять на оптимальность выбора процессоров.

Адекватность постулированной математической модели технологического объекта определяется близостью полученных переменных реального объекта и переменных модели. Исходные данные и в том, и в другом случае должны носить одинаковый характер [9,11,13,89,104,200,215,242].

В результате анализа как литературных источников, так и экспериментальных, было установлено 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.

В фазе зародышеобразования сама скорость гранулирования существенно снижается. Существенными факторами, оказывающими влияние на интенсивность образования зародышей являются влажность комкуемой смеси, физических и химических свойств и жидкой, и твердой фазы, присутствия (или отсутствия) образовавшегося гарнисажа, конструкции гранулятора и режимов его работы.

Результатом экспериментов по исследованию переноса влаги, содержащейся в порах комкуемой смеси, из более плотных центральных слоев, расположенных в сердцевине, в менее плотные окраинные слои гранулы, стал тот факт, что увеличение давления на комкуемую смесь на пять мегапаскалей приводит к тому, что все элементы формируемой массы (как разрушенные, так и скомковавшиеся) легко деформируются и агломерируются.

Таким образом, можно предположить, что при условии, что в комкуемой смеси в силу определенных причин возникнет такое давление, это приведет к слипанию (агломерированию) частиц и, как следствие, возникновению зародыша гранулы. Причиной такого давления является кинетическая энергия движущихся частиц при их столкновении.

В момент столкновения частиц происходит переход большей части их кинетической энергии в потенциальную. Основным условием образования зародышей гранул полидисперсного материала является условие, что кинетическая энергия частицы будет меньше некоторого критического значения. Источником такого высокоскоростного потока частиц является активатор гранулятора.

Линейная скорость частиц определяется угловой скоростью (скоростью вращения) активатора. Вероятность образования зародышей гранулы увеличивается и при увеличении массы частиц, т.к. кинетическая энергия зависит от скорости, а также является и функцией массы. А следовательно, гранулометрический состав комкуемой смеси будет оказывать значительное влияние на интенсивность образования зародышей из исходного материала. Таким образом, задавая диапазоны изменения масс комкуемых частиц исходной

смеси, можно определить диапазоны угловых скоростей активатора для определения зависимости образования зародышей из исходной смеси в зависимости от скорости активатора.

Источником пластической деформации (слипания) зародышей является их (частиц) потенциальная энергия, образующаяся после контакта. Во время этого происходит переход части кинетической энергии исходных частиц (до столкновения) в кинетическую энергию образовавшегося зародыша гранулы.

Тогда, принимая во внимание закон сохранения энергии, выражение, описывающее изменение энергии частиц, возникшее в результате столкновения, может быть представлено в виде:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2) v_3^2}{2} + k_1 p (m_1 + m_2); \quad (5.1)$$

где: m_1, m_2 – масса частиц скоростного и основного потока, кг;

v_1, v_2 – скорость частиц до столкновения, м/сек;

v_3 – скорость зародыша (частиц после столкновения), м/сек;

p – давление в месте контакта частиц, МПа;

k_1 – масштабный коэффициент, м²/(МПа*сек²).

$$v_1 = \pi d n; \quad (5.2)$$

$$v_2 = \sqrt{1,75 q D (\sin \alpha - f \cos \alpha)}; \quad (5.3)$$

где: d, D – диаметр, описываемый лопастями активатора, диаметр тарели, м;

n – скорость вращения лопастей активатора, об/сек;

α – угол наклона тарели, град.;

f – коэффициент трения качения, 1/м.

При поступлении в гранулятор исходная полидисперсная смесь, представляющая собой сыпучую микроагрегатированную субстанцию, имеет влажность в пределах семи – девяти процентов. В первоначальный период одним из самых существенных факторов, влияющих на процесс первичного образования

зародышей гранул, является активатор, режимы его работы. Так происходит до момента начала образования гарнисажа.

Окружная (линейная) скорость частиц, находившихся в первоначальный момент на лопастях активатора, а затем «сходящих» с этих лопастей, одинакова.

Причиной такого явления является тот факт, что лопасти активатора находятся в достаточно уплотненном влажном материале (полидисперсной смеси) и при своем вращении создают поток частиц, обладающий достаточно высокой скоростью. Число образующихся зародышей гранул зависят как от окружной скорости лопастей активатора, так и от их площади.

При увеличении числа оборотов лопастей активатора в гранулируемом продукте образуется воронка, что приводит к такому явлению, как разрушение уже образовавшихся гранул. Образование воронки способствует и уменьшению уже сформированных зародышей. Следствием этого является снижение мощности потока.

Верхняя часть активатора также принимает непосредственное участие в процессе гранулообразования. Лопасти активатора в своей верхней части дезагрегируют гранулы более крупных размеров, результатом чего является образование мелких и средних гранул. Кроме этого в смеси остаются и зародыши гранул. Таким образом, «активность» верхней части активатора способствует увеличению числа зародышей.

Наряду с факторами, влияющими на процесс гранулообразования, рассмотренными выше, необходимо отметить, что капли жидкости, попадающие на полидисперсный материал, образуют в сравнительно небольшом объеме зародыши будущих гранул. Образовавшиеся зародыши вследствие невысокой механической прочности либо разрушаются вращающимися лопастями активатора, либо уплотняются ими.

При осуществлении процесса гранулирования можно выделить ряд теорий, поясняющих механизм роста гранул [25, 137, 269, 267, 355].

Избыточная влага, особенно при большом количестве тонкодисперсной фазы в комкуемом материале приводит к тому, что при осуществлении процесса

гранулообразования преобладает коалесценция – слипание частиц внутри или на поверхности смеси. В конце процесса окатывания мелкие частицы наслаиваются на крупные. Однако рост гранул за счёт коалесценции ограничивается предельным размером. Факторами, определяющими предельный размер гранул, являются пластичность и влагосодержание гранул. Повышение содержания влаги в грануле приводит к увеличению её пластичности и лучшей слипаемости за счёт чего гранулы имеют более крупные размеры по сравнению с гранулами с пониженным влагосодержанием.

Кроме того, частицы, оказавшиеся в активной зоне активатора, сталкиваются с уже образовавшимися зародышами и гранулами, что, в свою очередь, вызывает рост числа новых зародышей.

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.

Оценивая зависимость скорости протекания гранулирования от влагосодержания смеси, было отмечено, что для каждой смеси есть некоторая величина содержания влаги, которое получило название «критическое влагосодержание». При влажности гранулируемой смеси ниже этой величины скорость роста гранул практически незначительна. При содержании влаги в смеси больше критического образуются крупные рыхлые комки. Такие комки, имеющие недостаточную плотность, легко разрушаются даже под действием собственного веса, что приводит к снижению «выхода» гранул заданного размера и формы

Зависимость скорости образования и роста гранул от влагосодержания смеси имеет экспоненциальный характер, но лишь до некоторой определенной (критической) величины [187].

Влагосодержание гранулируемой смеси в конкретный момент времени (W_T) может быть определено по формуле:

$$W_T = W_{\min} + \mu(F\Delta t / G)100\%, \quad (5.4)$$

где: W_{\min} - исходное влагосодержание продукта, %;

G - текущий вес гранулируемого продукта, кг;

F - массовый расход влаги, поступающей в форсунку гранулятора, кг/сек;

Δt - длительность промежутка времени, в течение которого осуществляется распыление влаги над гранулируемым материалом, сек;

μ - коэффициент, учитывающий долю влаги, попавшей на полидисперсную смесь, от количества влаги, поступившей в форсунку гранулятора (определяется экспериментально).

Факторами, влияющими на выбор количества влаги, подающейся через форсунки, являются состав и свойства исходной полидисперсной смеси. При этом каждой конкретной смеси должно соответствовать строго определенное значение влажности. Изменение состава смеси должно сопровождаться корректировкой рабочей влажности.

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 K -0,6-0,8.

Фактором, влияющим на эффективность процесса, является степень (коэффициент) заполнения тарели гранулятора исходной смесью. Данный коэффициент зависит от конструкции гранулятора, режимов его работы, а следовательно, характера и режима движения смеси на тарели. Процесс будет эффективен при условии выполнения режима перекачивания гранулируемой смеси. По данным работы [77] данное условие выполняется при увеличении удельной нагрузки до 0,2 т/м².

Возрастание данного коэффициента ведет к уменьшению подвижности гранулируемой смеси в грануляторе и ухудшению разделения гранул. Производительность процесса снижается.

Характер протекания процесса гранулирования зависит и от места (зоны) расположения смеси на тарели гранулятора. В каждой зоне гранулируемая смесь движется по траектории, характерной именно для данного положения смеси. Изменения состояния смеси также зависят от зоны её расположения. Обеспечение режима переката обеспечивается режимными параметрами гранулятора. Основными конструктивными параметрами для данного случая является угол наклона тарели и её угловая скорость.

Большое значение в процессе окатывания полидисперсных смесей имеет образующийся в грануляторе донный и боковой гарнисаж. Основное условие образования гарнисажа – влажность смеси. При влажности смеси, превышающей 11–12 %, мелкие вновь образовавшиеся гранулы, а также мелкодисперсные частицы исходной смеси впрессовываются более крупными гранулами в постепенно образующийся твердый слой, образуя тем самым уплотненный «защитный» слой – гарнисаж. Толщина гарнисажа по мере продолжительности процесса увеличивается и при её превышении величины зазора между ножами и стенками или дном гранулятора происходит срезание части гарнисажа специальными ножами, являющимися частью гранулятора. Срезанные частицы, как наименее уплотненные, распадаются и служат основой для образования новых гранул.

Уплотнение гранул происходит одновременно с образованием новых зародышей, их агломерированием и ростом. Окончательное уплотнение является конечным этапом процесса образования гранул, а уплотненные, более прочные гранулы, «прикатывая» зародыши, ускоряют и стабилизируют процесс.

Как показали проведенные испытания, прочность образовавшихся гранул практически не зависит от конструктивных особенностей гранулятора и режимов его работы. Однако, при работе должен обеспечиваться режим переката.

Максимальная же плотность зависит от содержания влаги в полидисперсной смеси, подвергаемой гранулированию.

Изменяя силу, с которой лопасть активатора воздействует на гранулу, можно верифицировать её (гранулы) геометрические размеры. Это достигается за счет изменения угловой скорости активатора. При этом гранулы, находящиеся на периферии тарели и имеющие меньшую прочность, раскалываются; осколки смещаются к центру тарели, вовлекаются в движение, агрегатируются, образуя новые зародыши. Процесс гранулообразования стабилизируется, следствием чего является повышение производительности гранулятора.

Представленный выше 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 [8,9]. Необходимым условием для использования данных уравнений является условие нахождения полидисперсной смеси в процессе гранулирования 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

Такое пребывание в семи состояниях свойственно исследуемой смеси на основе молочной сыворотки и имеющей в своём составе также клюквенный шрот, сахарную пудру, крахмал и другие компоненты

На основании описания кинетики процесса гранулирования, приведенного выше, был разработан граф состояний быстрорастворимой полидисперсной смеси в грануляторе тарельчатого типа с активатором (рисунок 5.26).

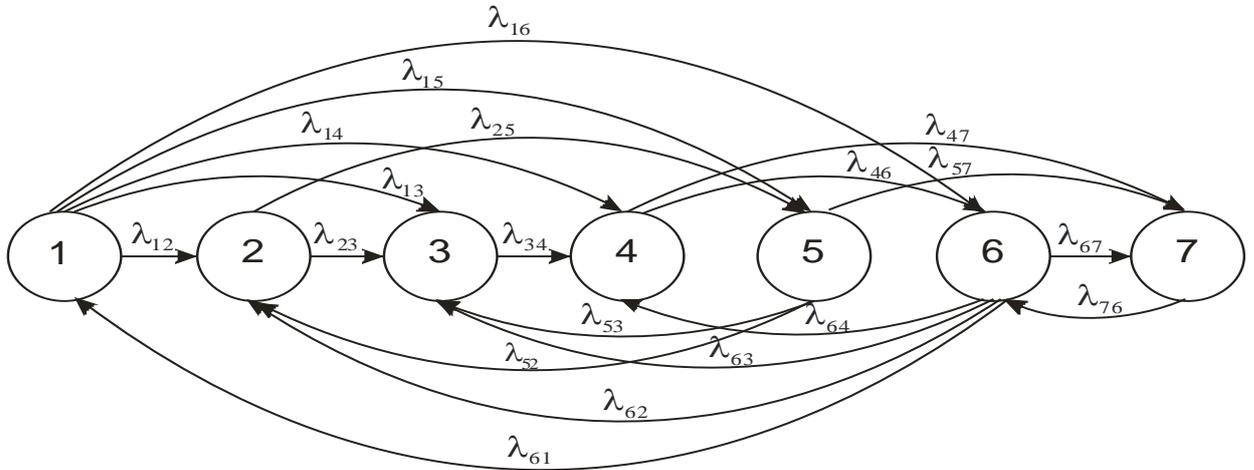


Рисунок 5.26. Граф состояний инстантированного полидисперсного продукта в процессе гранулирования в тарельчатом грануляторе с активатором

Процесс гранулирования последовательно проходит две фазы. Во время первой гарнисаж не образуется; во время второй процесс протекает с образованием гарнисажа. Причина в том, что формирование гарнисажа начинается при содержании влаги в смеси более 11 процентов, в то время как исходная смесь имеет влажность менее 8 процентов.

При постулировании математической модели процесса образования гранул с использованием молочной сыворотки были применены дифференциальные уравнения Колмогорова [7,14,15,16]:

$$\left. \begin{aligned}
 dP_1/dt &= -\lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{13}P_1(t) - \lambda_{14}P_1(t) - \lambda_{16}P_1(t) + \lambda_{61}P_6(t); \\
 dP_2/dt &= -\lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{62}P_6(t) + \lambda_{12}P_1(t); \\
 dP_3/dt &= -\lambda_{34}P_3(t) + \lambda_{63}P_6(t) + \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{13}P_1(t); \\
 dP_4/dt &= -\lambda_{46}P_4(t) - \lambda_{47}P_4(t) + \lambda_{64}P_6(t) + \lambda_{34}P_3(t) + \lambda_{14}P_1(t); \\
 dP_6/dt &= -\lambda_{61}P_6(t) - \lambda_{62}P_6(t) - \lambda_{63}P_6(t) - \lambda_{64}P_6(t) - \lambda_{67}P_6(t) + \lambda_{76}P_7(t) + \lambda_{46}P_4(t) + \lambda_{16}P_1(t); \\
 dP_7/dt &= -\lambda_{76}P_7(t) + \lambda_{67}P_6(t) + \lambda_{47}P_4(t); \\
 P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_6(t) + P_7(t) &= 1
 \end{aligned} \right\} (5.5)$$

$$\left. \begin{aligned}
 dP_1/dt &= -\lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{13}P_1(t) - \lambda_{14}P_1(t) - \lambda_{15}P_1(t) - \lambda_{16}P_1(t) + \lambda_{61}P_6(t); \\
 dP_2/dt &= -\lambda_{23}P_2(t) - \lambda_{25}P_2(t) + \lambda_{52}P_5(t) + \lambda_{62}P_6(t) + \lambda_{12}P_1(t); \\
 dP_3/dt &= -\lambda_{34}P_3(t) + \lambda_{53}P_5(t) + \lambda_{63}P_6(t) + \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{13}P_1(t); \\
 dP_4/dt &= -\lambda_{46}P_4(t) - \lambda_{47}P_4(t) + \lambda_{64}P_6(t) + \lambda_{34}P_3(t) + \lambda_{14}P_1(t); \\
 dP_5/dt &= -\lambda_{53}P_5(t) - \lambda_{52}P_5(t) - \lambda_{57}P_5(t) + \lambda_{25}P_2(t) + \lambda_{15}P_1(t); \\
 dP_6/dt &= -\lambda_{61}P_6(t) - \lambda_{62}P_6(t) - \lambda_{63}P_6(t) - \lambda_{64}P_6(t) - \lambda_{67}P_6(t) + \lambda_{76}P_7(t) + \lambda_{46}P_4(t) + \lambda_{16}P_1(t); \\
 dP_7/dt &= -\lambda_{76}P_7(t) + \lambda_{67}P_6(t) + \lambda_{57}P_5(t) + \lambda_{47}P_4(t); \\
 P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_7(t) &= 1
 \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

где: $P_1(t) - P_7(t)$ – вероятность нахождения полидисперсного материала в указанных выше состояниях (определяется как отношение веса продукта в i -ом состоянии к суммарному весу продукта во всех выделенных состояниях),

$\lambda_{12} - \lambda_{67}$ - интенсивности перехода материала из одного состояния в другое (первая цифра индекса указывает состояние, из которого материал переходит в новое состояние, указанное второй цифрой индекса).

Предлагаемая математическая модель содержит уравнения корреляции переходных процессов исходной смеси из одного состояния в другое с учетом ее фазового состава, влажности. В данной модели могут быть учтены способность смеси к агрегатированию, режимы работы и конструктивные параметры гранулятора.

Примем соотношение приращения массы смеси (как положительное, так и отрицательное) в любом состоянии и временем, в течение которого произошло это приращение с учетом массы смеси на тарели гранулятора, как интенсивность преобразования комкуемой смеси из одного состояния в другое.

Значительное влияние на интенсивность переходов оказывают масса смеси, которая может находиться в одном или нескольких состояниях, её влажность, способность к агрегатированию, а также технологические режимы и особенности конструкции тарельчатого гранулятора с активатором.

Отношение массы смеси в каждом состоянии в определенное время к исходной её массе (принимая во внимание количество жидкости, поступающей в гранулятор для ее увлажнения) будет определять вероятность пребывания полидисперсной смеси в одном из указанных выше семи состояниях.

Таким образом, в соответствии с предложенным механизмом образования гранул из полидисперсной смеси основными факторами, оказывающими влияние на интенсивность преобразования исходного материала в зародыши гранул (λ_{12}), являются:

- концентрация сыворотки, которая обладает наибольшими адгезионными свойствами в гранулируемом материале;

- конструктивные параметры активатора (форма и количество лопастей, площадь лопастей, принимающая непосредственное участие в процессе); частота его вращения; угловая скорость активатора, формируя поток комкуемых частиц исходной смеси, должна обеспечить максимальную интенсивность образования зародышей:

- количество поступающей через форсунки влаги, подаваемой в гранулятор для увлажнения гранулируемой полидисперсной смеси на втором стадии процесса зародышеобразования; на первой стадии процесса происходит слипание частиц исходной смеси с высоким содержанием «собственной» влаги;

- конструктивных размеров гранулятора и в частности его тарели, т.к. с увеличением ее диаметра положительный результат от воздействия вращающегося активатора на зародыши гранул уменьшается.

- диаметра тарели гранулятора: увеличение его диаметра значительно снижает эффект воздействия на смесь вращающегося активатора.

Тогда можно определить интенсивность зародышеобразования, руководствуясь формулами (5.7) и (5.8):

$$\lambda_{12} = K_{12} P_1 [K_{v2} \Delta V / V_m + K_{p2} S P_1 / (0,001n) + K_w \exp(W / 2,1) + K_{t1} / D] \quad (5.7)$$

$$\Delta V = 3,14dn - V_m; \quad (5.8)$$

где V_m - минимальная линейная скорость частицы, сходящей с лопасти активатора, при которой начинается процесс образования зародышей, м/сек;

S - текущая геометрическая площадь лопастей активатора, м²; D - диаметр тарели, м;

$K_{v2}(1/сек), K_{p2}(об/м^2 * сек^2), K_w(1/‰ * сек), K_{t1}(м/сек)$ - весовые коэффициенты, определяющие вклад каждого слагаемого выражения (5.7) в интенсивность перехода исходной смеси в зародыши (определяются экспериментально).

Результатом экспериментов стало определение факторов, определяющих интенсивность такого перехода. К ним относятся:

- насыщенность комкуемой (исходной) смеси, а также гранул, имеющих соответствующий размер, в грануляте;
- влагосодержание гранулируемой смеси;
- гидрофильность, гранулометрический состав гранулируемой смеси, её влажность, коллоидные фракции – то есть то, что можно определить как показатели комкуемости исходного материала;
- параметры, которые относятся непосредственно к конструкции гранулятора, его активатора, а также режимы их работы.

Эффективность окатывания при условии осуществления процесса в тарельчатых грануляторах обеспечивается за счет следующих условий:

- выдерживание режима переката гранул;
- произвольная дислокация зон гранулообразования [356].

К факторам, обеспечивающим данные условия, относятся, во-первых, процент (коэффициент) наполнения тарели гранулятора, а во-вторых, конструктивные характеристики самого гранулятора (угол наклона тарели, её угловая скорость и др.), а также режимами его работы. Условие, обеспечивающее отрыв гранулы, находящейся в верхней точке траектории на тарели гранулятора описывается уравнением [137]:

$$\frac{f}{r_{cp}} = \operatorname{tg} \alpha - \frac{D\omega^2}{4q \cos \alpha}; \quad (5.9)$$

где: ω - угловая скорость вращения тарели, рад/сек;

f - коэффициент трения качения, 1/м;

r_{cp} - средний размер формирующихся гранул, м;

q - ускорение свободного падения, м/сек².

Высота борта тарели H определяется по формуле [102]:

$$H = 0,15D . \quad (5.10)$$

Кроме того, для того, чтобы обеспечить режим перекачивания, активатор должен размещаться в зоне нахождения крупных агрегированных частиц и гранул. При таком расположении верхняя часть активатора разрушает крупные гранулы, а нижняя – «содействует» процессу образования зародышей.

Принимая во внимание свойства исходной полидисперсной смеси на основе молочной сыворотки, были определены конструктивные параметры тарельчатого гранулятора с активатором, обеспечивающие режим переката комкуемого материала и сегрегации образовавшихся гранул. Для выполнения данных условий соотношение диаметра лопастей активатора и диаметра тарели гранулятора должно находиться в пределах от 1:12 до 1:18. Активатор должен быть установлен в 5–10 мм от дна и борта.

На каждую из частиц, находящихся на тарели, действуют центробежные силы (вследствие вращения тарели), силы гравитации (в связи с наклоном тарели) и силы трения смеси о поверхность вращающейся тарели. Одновременно происходит увлажнение смеси через форсунки гранулятора. В результате зародыши гранул, двигаясь по сложной траектории агрегируются и наращиваются. Крупные гранулы попадают в зону активатора, разрушающего их.

В соответствии с указанными факторами интенсивность перехода исходной смеси в состояния 3, 4, 6 будет определяться по выражению (5.11).

$$\begin{aligned} \lambda_{1j} = & K_{1j} P_1 P_j [K_{vj} \Delta V / V_m + K_{pj} S P_1 / (0,001n) + K_w \exp(W / 2,1) + \\ & + K_k / (1 - K)^{4,5} + K_{ij} / (0,1 + \Delta D / D_m)], \end{aligned} \quad (5.11)$$

$j = 3, 4, 6;$

где: K - коэффициент комкуемости исходной дисперсной смеси;

D_m - минимальный диаметр тарели гранулятора, который определяет нижний предел диапазона его изменения при поиске оптимальных значений (задается исследователем), м;

ΔD - приращение диаметра тарели по сравнению с его минимальным значением, которое будет использоваться при исследовании процесса, м.;

$K_{ij}(1/сек)$, $K_k(1/сек)$ - весовые коэффициенты, определяющие вклад соответствующих слагаемых в интенсивность перехода исходной смеси на гранулы.

При налипании на зародыши гранул мелких частиц гранулируемой смеси происходит как образование новых, так и рост уже имеющихся гранул. Факторами, влияющими на интенсивность перехода, будут являться влагосодержание гранулируемой смеси, её способность к комкуемости, режимов работы гранулятора и особенности его конструкции. Интенсивность данного перехода определяется следующим выражением:

$$\lambda_{ij} = K_{ij} P_1 P_{j-1} [K_{vj} \Delta V / V_m + K_{pj} S P_1 / (0,001n) + K_w \exp(W / 2,1) + K_k / (1 - K)^{4,5} + K_{ij} (0,1 + \Delta D / D_m)], \quad (5.12);$$

$$ij = 23,34;$$

Интенсивность преобразования гранул из четвертого и седьмого состояний в состояние 6 описывается выражениями (5.13) и (5.14):

$$\lambda_{46} = K_{46} P_1 P_4 [K_w \exp(W / 2,1) + K_k (1 - K)^{4,5} + K_{t6} (0,1 + \Delta D / D_m)]; \quad (5.13)$$

$$\lambda_{76} = K_{76} P_1 P_7 [K_w \exp(W / 2,1) + K_k (1 - K)^{4,5} + K_{t6} (0,1 + \Delta D / D_m)]; \quad (5.14)$$

Важнейшими факторами, влияющими на интенсивность преобразования (перехода) крупных гранул гранулируемой смеси (шестое состояние) в состояния, предшествующие или последующие состоянию 6 (первое, второе, третье, четвертое и седьмое состояния), являются активная поверхность активатора, а также его угловая скорость. Данная интенсивность определяется по формуле:

$$\lambda_{ij} = K_{ij} P_6 (K_n \Delta n / n_m + K_s S), ij = 61,62,63,64,67; \quad (5.15)$$

где: $\Delta n = n - n_m$; n_m - минимальная скорость вращения лопастей активатора, при которой происходит разрушение крупных гранул, об/сек;

$K_n(1/сек)$, $K_s(1/сек * м^2)$ - коэффициенты, учитывающие вклад соответствующего слагаемого выражения (5.12) в интенсивность перехода.

Интенсивность образования гарнисажа из исходной мелкодисперсной смеси и зародышей гранул определяется такими факторами, как фракционный состав исходной смеси, содержание влаги и способность смеси к комкованию, а также конструкции гранулятора и режимов его работы. Интенсивность такого преобразования определяется по формуле:

$$\lambda_{ij} = K_{ij} P_i [K_w \exp(W/2,1) + K_k / (1 - K)^{4,5} + K_{ij} (0,1 + \Delta D / D_m)], ij = 15, 25; \quad (5.16)$$

В свою очередь, интенсивность деагрегатирования под действием ножей образовавшегося гарнисажа на мелкие гранулы и зародыши зависит от его количества на тарели, её диаметра и частоты вращения. Следует отметить, что положение ножей для срезания гарнисажа, предусматриваемых в конструкции гранулятора, существенного влияния на интенсивность процесса срезания гарнисажа не оказывает и при проведении исследований не рассматривалось.

Интенсивность такого преобразования определяется по формуле:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{ij} &= 0, \text{ при } G_d \leq 0, \\ \lambda_{ij} &= K_{ij} [P_5 - K_G (D + 0,15k_z D) / D_m]^2 / G] * \\ &[K_D (D - D_m) + K_{ND} (N - N_m) (D + \\ &+ 0,15k_z D)^2], \text{ при } G_d > 0, ij = 52, 53, \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

где: G_d - относительное количество полидисперсного материала, остающегося на дне и стенке тарели гранулятора в виде гарнисажа после окончания процесса гранулирования, оно определяется по выражению (5.18).

$$G_d = P_5 - K_G (D + 0,15k_z D) / D_m)^2 / G; \quad (5.18)$$

N, N_m - текущая и минимальная скорость вращения тарели гранулятора, об/сек;

K_G - коэффициент, зависящий от расстояния между донными ножами и поверхностью дна тарели, кг;

K_D - масштабный коэффициент, равный 1,1 (1/м*сек);

K_{ND} - масштабный коэффициент, равный 0,026 (1/м²*об.);

k_z - коэффициент заполнения тарели.

Как видно из зависимости (5.17), при равномерном распределении гарнисажа по диаметру тарели и по высоте её борта, при превышении толщины гарнисажа величины зазора между бортовыми и донными ножами и бортом тарели и дном гранулятора соответственно, начинается преобразование образовавшегося гарнисажа в мелкие гранулы и зародыши гранул.

Одновременно с ростом зародышей происходит их уплотнение. и как следствие, образуется плотная «устойчивая» гранула. Плотные, агрегатированные гранулы стабилизируют процесс гранулообразования наряду с ростом гранул и зародышей.

Наиболее существенным фактором, влияющим на плотность полученных при окатывании гранул, является влажность гранулируемой смеси. Важными факторами являются также свойства смеси и размеры гранул. Режимы гранулирования, а также конструктивные размеры гранулятора на плотность гранул влияли в незначительной степени. Плотность гранулы снижается по мере удаления от центра вращения тарели. Исходя из этого, получать гранулы с необходимыми размерами и плотностью можно, варьируя силу удара по грануле [181]. Это достигается изменением угловой скорости гранулятора.

Для описания преобразования гранулы из состояния 4 в состояние 7 (рисунок 5.26), в процессе которого происходит её уплотнение, воспользуемся выражением:

$$\lambda_{47} = K_{47} P_4 [K_W \exp(W / 2,1) + K_k / (1 - K)^{4,5} + K_y \Delta n / n_m]; \quad (5.19)$$

где: K_y - коэффициент, связывающий относительную скорость вращения активатора с интенсивностью перехода гранул из состояния «4» в состояние «7» (1/сек).

Результаты проверки адекватности математической модели, примененной в данном разделе, приведены в [181].

5.3 Результаты идентификационных экспериментальных исследований

Состав полидисперсной смеси для проведения исследований: клюквенный шрот (20%); подсырная сыворотка (деминерализованная) (40%); сахарная пудра (20%); картофельный крахмал (5%); УСТФ (10%); премиксы (5%). Параметры гранулятора и режимы его работы:

параметры тарели:

– диаметр рабочей тарели (D) – 800 мм; – угол наклона тарели (α) – 45 град.; – высота борта (H) – 100 мм; – скорость вращения рабочей тарели (N) – 45 об/мин.,

параметры активатора:

– скорость вращения активатора – (n) – 2200 об/мин; – диаметр вращения лопастей активатора (d) – 60 мм; – высота лопасти (h) – 50 мм; – ширина лопасти (a) – 10 мм;

– коэффициент комкуемости полидисперсного материала (K) - 0,7;

– начальное влагосодержание исходного материала, поступающего в гранулятор (W_m) – 8%;

– расход жидкости, проходящей через форсунку гранулятора (F) – 0,12 кг/мин;

– вес исходного объема исследуемого полидисперсного материала, подаваемого в гранулятор до гранулирования (G) – 30 кг;

– временной интервал, соответствующий промежутку между заборами проб, осуществляемый для выяснения гранулометрического состава перерабатываемой смеси при выполнении исследования (Δt) – 1 мин;

– промежуток времени между стадиями подачи жидкой фазы из форсунки при осуществлении гранулирования материала (Δt_w) – 1 мин.

Исследование гранулометрического состава смеси было проведено с использованием метода ситового анализа (см. главу 2). Число сит – 4; диаметр отверстий в ситах: 0,25; 0,5; 1,0; 3,0 мм. Точность взвешивания ситовых остатков – 0,05 г (весы технические ВТК-500).

В таблице 5.2 приведены экспериментальные данные исследований динамики процесса гранулообразования многокомпонентных смесей на основе молочной сыворотки и шрота клюквы.

Таблица 5.2 – Результаты экспериментального исследования динамики процесса гранулирования полидисперсного материала

№ пробы	t, мин	W, %	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
0	0	8,00	1,00	0	0	0	0	0	0
1	1	8,38	0,92	0,08	0	0	0	0	0
2	2	8,76	0,84	0,13	0,03	0	0	0	0
3	3	9,13	0,76	0,14	0,08	0,02	0	0	0
4	4	9,52	0,67	0,14	0,11	0,08	0	0	0
5	5	9,90	0,56	0,13	0,12	0,18	0	0,01	0
6	6	10,28	0,40	0,12	0,10	0,26	0	0,05	0,05
7	7	10,66	0,27	0,12	0,10	0,28		0,09	0,14
8	8	11,04	0,18	0,11	0,11	0,28	0	0,07	0,25
9	9	11,42	0,10	0,06	0,10	0,25	0,06	0,04	0,35
10	10	11,8	0,10	0,08	0,10	0,21	0,06	0,03	0,45
11	11	12,18	0,07	0,06	0,09	0,18	0,07	0,03	0,50
12	12	12,56	0,05	0,07	0,09	0,16	0,07	0,03	0,53
13	13	12,94	0,06	0,07	0,08	0,13	0,06	0,03	0,57
14	14	13,32	0,05	0,06	0,07	0,12	0,06	0,03	0,62
15	15	13,7	0,05	0,06	0,06	0,09	0,06	0,02	0,66
16	16	14,08	0,04	0,05	0,05	0,07	0,05	0,02	0,63

Включена влажность смеси (W, %), вероятность пребывания полидисперсной смеси в выделенных состояниях для моментов времени (P₁(t)-P₂(t)). В [181] описана методика их проведения

Данная вероятность определялась как отношение массы смеси в каждом из состояний к массе продукта в начале процесса гранулирования, принимая во внимание массу воды, подаваемой через форсунки гранулятора с целью увлажнения гранулируемой смеси.

В таблице 5.3 приведены экспериментальные данные (а также данные, полученные при рабочей эксплуатации гранулятора) исследований влияния

параметров гранулятора и характеристик исходной гранулируемой смеси на качество (гранулометрический состав) полученных (готовых) гранул.

Таблица 5.2 – Результаты экспериментального исследования динамики процесса гранулирования полидисперсного материала

№ пробы	t, мин	W, %	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
0	0	8,00	1,00	0	0	0	0	0	0
1	1	8,38	0,92	0,08	0	0	0	0	0
2	2	8,76	0,84	0,13	0,03	0	0	0	0
3	3	9,13	0,76	0,14	0,08	0,02	0	0	0
4	4	9,52	0,67	0,14	0,11	0,08	0	0	0
5	5	9,90	0,56	0,13	0,12	0,18	0	0,01	0
6	6	10,28	0,40	0,12	0,10	0,26	0	0,05	0,05
7	7	10,66	0,27	0,12	0,10	0,28		0,09	0,14
8	8	11,04	0,18	0,11	0,11	0,28	0	0,07	0,25
9	9	11,42	0,10	0,06	0,10	0,25	0,06	0,04	0,35
10	10	11,8	0,10	0,08	0,10	0,21	0,06	0,03	0,45
11	11	12,18	0,07	0,06	0,09	0,18	0,07	0,03	0,50
12	12	12,56	0,05	0,07	0,09	0,16	0,07	0,03	0,53
13	13	12,94	0,06	0,07	0,08	0,13	0,06	0,03	0,57
14	14	13,32	0,05	0,06	0,07	0,12	0,06	0,03	0,62
15	15	13,7	0,05	0,06	0,06	0,09	0,06	0,02	0,66
16	16	14,08	0,04	0,05	0,05	0,07	0,05	0,02	0,63

Калибровка гранул проводилась по трем размерам: менее 1 мм, 1–3 мм и более 3-х мм. Калибровка проводилась с использованием стандартных сит.

В таблице 5.3 в столбце P_{oc} приведена вероятность совместного состояния гранул менее 1 мм и гарнисажа (при влагосодержании более 11 %).

5.4 Алгоритмы параметрической идентификации процесса гранулирования полидисперсных продуктов

Определение параметров, которые обеспечивают наименьшее рассогласование параметров исследуемого процесса и постулированной модели,

является целью проверки адекватности моделей различных технологических систем.

Условие, при котором производится параметрическая идентификация [141,181] процесса, – это неизменность задаваемых критериев, как для реальных исследуемых объектов, так и для моделей их технологических процессов.

В качестве параметра параметрической идентификации был выбран так называемый критерий близости. Он определяется выражением:

$$J = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_j (P_{ij}^m - P_{ij}^e)^2}}{nm}; \quad (5.20)$$

где: P_{ij}^e, P_{ij}^m - соответственно экспериментальное и модельное значение вероятности i -го состояния продукта при j -ом эксперименте;

α_j - весовой коэффициент, определяющий значимость j -ого экспериментального значения вероятности продукта (задается экспертами);

n - количество состояний гранулируемого продукта (при решении первой системы дифференциальных уравнений - 6, при второй - 7);

m - количество интервалов времени, через которые определялся гранулометрический состав полидисперсного продукта при экспериментальном исследовании динамики процесса гранулирования.

Управление процессом производится при большом (более 40) количестве регулируемых параметров. Кроме того, при проведении исследований 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; эти экспериментальные данные получены при изменении хотя бы одного из регулируемых входных параметров (режимы работы гранулятора, структурным составом гранулируемой смеси и т.д.).

Проверка проводится в два этапа:

Этап 1. Из таблицы 5.2, которая содержит экспериментальные данные, входящие в 1-й массив определяются:

– коэффициенты динамики ($K_{12} - K_{67}$); данные коэффициенты связывают интенсивность переходов при осуществлении процесса гранулообразования с параметрами, непосредственно воздействующими на процесс;

– параметрические коэффициенты и константы, входящие в уравнения 5.7–5.19: к ним, в частности, относятся: определяющий угловую скорость минимальный диаметр тарели D_m (для данного гранулятора $D_m = 0,6$ м); минимальное значение сходящей с лопасти активатора частицы смеси V_m (для данного гранулятора $V_m = 290$ м/мин); минимальное значение для коэффициента комкуемости K_m принимаем $K_m = 0,6$; коэффициенты $K_{v2} = 0,01$; $K_{v3} = 0,01$; $K_{v4} = 0,005$; $K_{v6} = 0,002$ (1/сек показывают связь интенсивности перехода исходной полидисперсной смеси в первоначальные зародыши, переходящие затем в гранулы со скоростью их отделения от лопастей активатора; взаимосвязь интенсивности преобразования исходной полидисперсной смеси в первоначальные зародыши и гранулы с активной поверхностью активатора выражается через коэффициенты $K_{p2} = 100,0$; $K_{p3} = 100,0$; $K_{p4} = 100,0$; $K_{p6} = 10,0$,об/м²*сек²; зависимость между интенсивностью перехода полидисперсной смеси из одного состояния в другое и её влагосодержанием выражается через коэффициент $K_w = 0,00005$ 1/%*сек; зависимость между интенсивностью перехода полидисперсной смеси и коэффициентом комкуемости выражается через коэффициент $K_k = 0,00003$; коэффициенты $K_{i1} = 0,008$ (м/сек); $K_{i2} = 0,007$ (1/м*сек); $K_{i3} = 0,03$ (1/м*сек); $K_{i4} = 0,04$; $K_{i5} = 0,02$; $K_{i6} = 0,03$ 1/м*сек, устанавливающие зависимости интенсивности перехода исходной полидисперсной смеси из одного состояния в другое от конструктивных параметров гранулятора; взаимосвязь между интенсивностью распада уже сформированных крупных гранул в более мелкие, в предельном случае даже в зародыши, и частотой вращения лопастей активатора отображается коэффициентом $K_n = 2,0$ 1/сек; возможность перехода уже окатанных гранул большего размера в более мелкие зависит от активной площади лопастей

активатора, и, как следствие, связана с разрушением крупных гранул, и отображена коэффициентом $K_s=4,0 \text{ м}^2 \cdot \text{сек}$; взаимосвязь перехода гранул из состояния «4» в состояние «7» с числом оборотов активатора показана коэффициентом $K_y=0,5 \text{ 1/сек}$; загруженность тарели исходной гранулируемой смесью, которое может изменяться от 0, что соответствует пустой тарели, до 1,0 в случае когда тарель полностью заполнена, отображается коэффициентом $K_z=0,56$; промежуток от поверхности тарели и ножами (бортовыми и придонными) отображается коэффициент $K_G=0,6 \text{ кг}$; весомость j -ого значения вероятности экспериментального продукта (α_j) в уравнении (5.20) на первом этапе исследования выражается через весовой коэффициент.

Константы $G, W_m, F, D, n, N, d, h, a, K$ выбираются из таблиц, приведенных в разделе 5.3.

Была поставлена задача, изменяя конструктивные размеры гранулятора с активатором, режимы его работы, а также фракционный состав полидисперсной смеси, определить минимальную линейную скорость частицы смеси, которая «запускает» механизм зародышеобразования. Такая минимальная линейная скорость была определена экспериментально; при этом определялась и минимальная скорость вращения активатора гранулятора, с которой визуально начиналось образование зародышей.

Данные, полученные экспериментально, были подтверждены теоретическими расчетами, выполненными при определенных условиях и допущениях. А именно:

- минимальный удельный вес исследуемого материала; исходя из этого условия, был выбран шрот клюквы;
- давление при соударении двух частиц в точке их контакта должно быть меньше 5 Мпа;
- 90 % кинетической энергии, возникающей при столкновении исходных гранулируемых частиц, трансформируется в потенциальную энергию, т.е. работу пластической деформации, характеризующей слипание этих частиц); 10% - переходит в кинетическую энергию формируемого зародыша.

– площадь пятна контакта соударяемых частиц во время их контакта, с учётом сложной конфигурации последних, равна 0,1 диаметра частиц;

– линейная скорость частиц, сходящих с лопасти активатора, имеет одинаковые значения, на неё оказывает влияние только диаметр лопастей активатора и его угловая скорость.

Полученный в ходе исследований объём экспериментальных данных, показывающий динамику процесса гранулирования исходных полидисперсных материалов использовался на последующем этапе, на котором выполнялось определение оптимальных значений для коэффициентов (K_{ij}). Поиск оптимальных значений коэффициентна K_{ij} проводился в следующем порядке.

1. Вычислялось содержание влаги в исследуемом материале в текущий момент времени по выражению (5.4).

2. Определялось выполнение условия: $W_T \geq 11\%$.

3. Решение дифференциальных уравнений, а также расчет интенсивности преобразования системы (уравнения 5.5, 5.6, 5.9, 5.11, 5.12, 5.17) производится при невыполнении условия, предусмотренного пунктом 2 ($W_T \geq 11\%$). Система уравнений (5.5, 5.6) описывает процесс образования гранул в данном пространственно-временном континууме без образования гарнисажа.

4. Решение дифференциальных уравнений (5.5, 5.6), а также расчет интенсивности преобразования системы (уравнения 5.7-5.19) производится при выполнении условия, предусмотренного пунктом 2 ($W_T \geq 11\%$). Система уравнений (5.17) в этом случае описывает процесс образования гранул в данном пространственно-временном континууме с образованием гарнисажа.

5. Из выражения (5.21) определяется разность между j -ми расчетными вероятностями и соответствующими вероятностями, полученными опытным путем:

$$\Delta P_{ij} = P_{ij}^o - P_{ij}^m, \quad i=1,2,\dots,n; \quad (5.21)$$

6. Из выражений (5.22) и (5.23) определяется сумма расхождений между вероятностными состояниями продукта и сумма квадратов этих расхождений

постулированных моделей и этих же вероятностей, полученных в ходе проведения экспериментов, в данном пространственно-временном континууме.

$$P_{ij}^c = P_{ij-1}^c + \Delta P_{ij}, i = 1, 2, \dots, 7 \quad (5.22)$$

$$P_{ij}^k = P_{ij-1}^k + \alpha_j \Delta P_{ij}^2, i = 1, 2, \dots, 7 \quad (5.23)$$

7. После повторения описанной последовательности операций для всех значений вероятностей состояний продукта, содержащихся в массиве экспериментальных данных по исследованию динамики процесса, полученных экспериментальным путем, по формуле (5.20) определялось значение критерия близости результатов постулированных моделей и результатов, полученных в ходе проведения экспериментов.

8. После определения критерия близости, настоящего и предшествующего циклов вычислений, находится расхождение между этими значениями. При этом для первого цикла вычислений предшествующее значение критерия близости назначалось экспертом.

9. Расчёт новых значений для коэффициентов K_{ij} (из формулы 5.24) возникает, если наблюдается расхождение между значениями критерия близости (5.20) после настоящего и предшествующего циклами вычислений превышало заданную величину. В этом случае вся процедура повторялась.

$$K_{ij} = K_{ij}^* + \beta_{ij} (P_{im}^c + P_{jm}^c)(P_{im}^k + P_{jm}^k), \quad (5.24)$$

где: K_{ij}^* - значение искомым коэффициентов, на предыдущем цикле вычислений;

β_{ij} - коэффициенты, связывающие величину изменения искомым коэффициентов с суммами и квадратами расхождений вероятностей состояний (задаются экспертами).

В выражении (5.24) индекс i показывает состояние гранулируемого продукта в текущей точке пространственно-временного континуума, из которой он перемещается в иное (j -е) состояние.

Проведение поиска оптимальных значений для коэффициентов динамики (K_{ij}) сходно с методом градиентов. Тогда знак суммы расхождений вероятностей

состояний для гранул указывает на направление изменения для этих коэффициентов, при этом квадрат расхождений вероятностей показывает влияние на размер шага их изменения.

О завершении процесса выявления коэффициентов динамики (K_{ij}) по достижении разницы между критериями близости (5.20) между двумя соседними циклами вычислениями, меньшей, чем заданная ранее величина. На рисунке 5.27 представлена блок-схема параметрической идентификации модели массива экспериментальных данных.

Решение уравнений, из которых определяется связь интенсивности перехода смеси из одного состояния в другое с параметрами конструкции гранулятора, режимами его работы, а также структурой и параметрами исходной полидисперсной смеси, представлены в блоках 7 и 10 (рисунок 5.27)

В блоках 9 и 12 показаны решения дифференциальных уравнений, которое было выполнено по методу Рунг-Кутта. Программирование осуществлялось в среде Delphi.; исходная программа приведена в [142].

В таблице 5.4 приведены полученные в результате приближенных расчетов начальных значений коэффициентов динамики, необходимых для выполнения программы параметрической идентификации модели динамики процесса гранулирования.

Таблица 5.4 – Приближенные значения коэффициентов динамики K_{ij}

K_{12}	K_{13}	K_{14}	K_{15}	K_{16}	K_{23}	K_{34}	K_{46}	K_{76}	K_{61}
0,3	0,4	30,0	40,0	80,0	50,0	70,0	40,0	3,0	4,0
K_{62}	K_{63}	K_{64}	K_{67}	K_{25}	K_{52}	K_{53}	K_{47}	K_{57}	
4,0	2,0	20,0	15,0	15,0	2,0	2,0	5,0	90,0	

Определение коэффициентов динамики включало в себя согласно разработанному алгоритму массив, состоящий из 108 итераций. Погрешность для критерия близости, вычисляемая по выражению (5.20), на двух соседних циклах вычислений не превышала 0,001%. Значение коэффициента β_{ij} в выражении (5.24) было принято равным 0,1

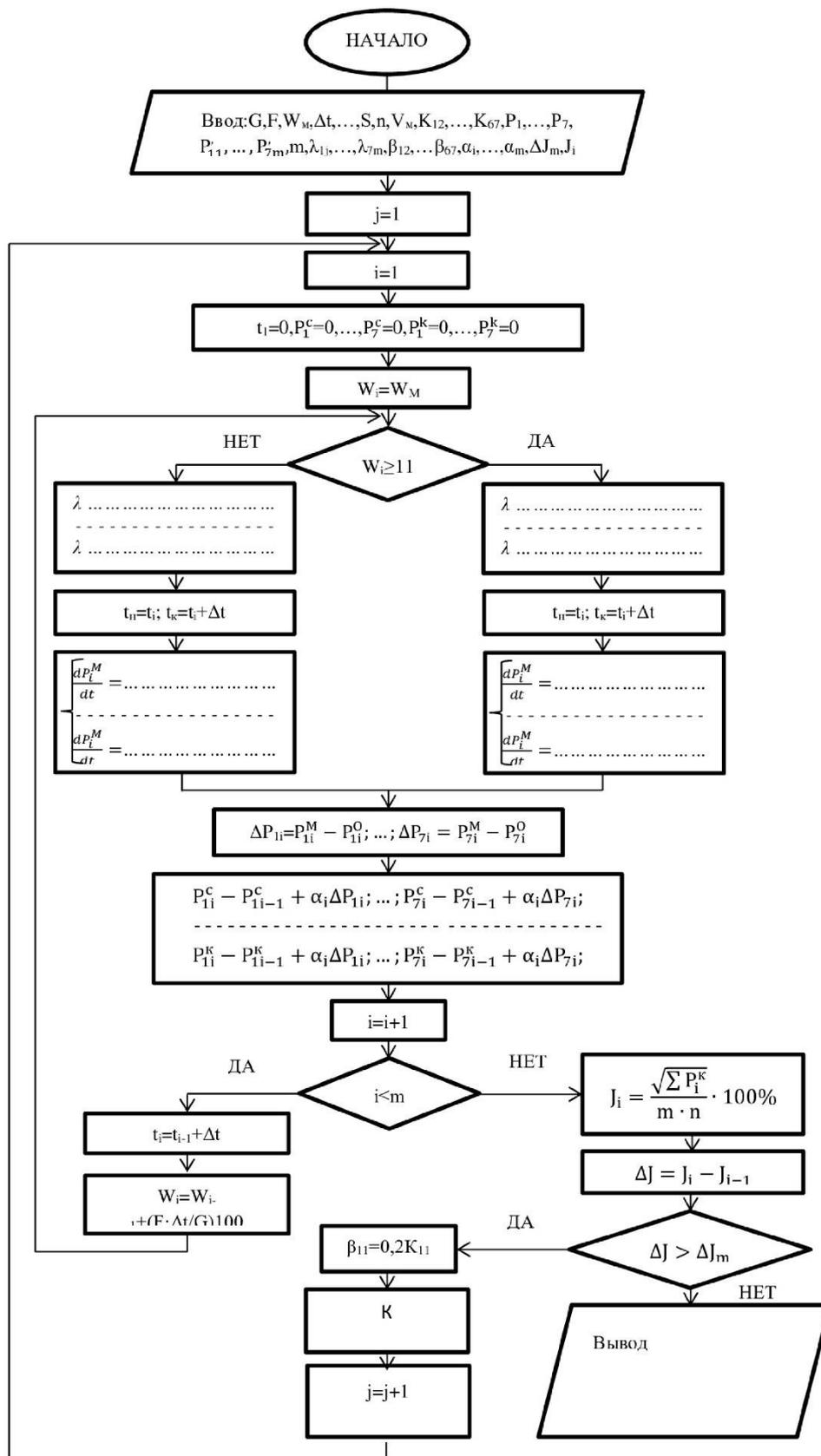


Рисунок 5.27 - Блок-схема алгоритма параметрической идентификации модели

Величина критерия близости экспериментальных и модельных значений вероятностей состояний полидисперсного продукта после завершения процесса вычислений (J) – 0,808%.

В таблице 5.5 приведены уточненные значения коэффициентов K_{ij} .

Таблица 5.5 – Уточненные значения коэффициентов динамики K_{ij}

K_{12}	K_{13}	K_{14}	K_{15}	K_{16}	K_{23}	K_{34}	K_{46}	K_{76}	K_{61}
0,385	0,682	20,93	44,89	81,53	29,51	70,91	47,85	2,09	2,71
K_{62}	K_{63}	K_{64}	K_{67}	K_{25}	K_{52}	K_{53}	K_{47}	K_{57}	
2,93	3,18	7,55	20,97	28,77	1,70	2,99	15,95	20,97	

Значения вероятностей состояний полидисперсного продукта, вычисленные после завершения процедуры идентификации показаны в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Результаты моделирования динамики процесса гранулирования

№ опыта	t, мин	W, %	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
1	1	8,38	0,907	0,093	0	0	0	0	0
2	2	8,76	0,832	0,108	0,059	0	0	0	0
3	3	9,13	0,769	0,104	0,094	0,031	0	0	0
4	4	9,52	0,675	0,100	0,097	0,122	0	0,001	0,003
5	5	9,90	0,530	0,093	0,095	0,232	0	0,018	0,029
6	6	10,28	0,388	0,087	0,094	0,263	0	0,064	0,103
7	7	10,66	0,295	0,085	0,096	0,235	0	0,082	0,208
8	8	11,04	0,244	0,084	0,100	0,203	0	0,067	0,305
9	9	11,42	0,170	0,078	0,102	0,174	0,053	0,052	0,374
10	10	11,80	0,133	0,073	0,103	0,148	0,048	0,041	0,457
11	11	12,18	0,110	0,068	0,103	0,128	0,045	0,034	0,516
12	12	12,56	0,092	0,064	0,102	0,112	0,043	0,029	0,560
13	13	12,94	0,079	0,060	0,102	0,099	0,042	0,026	0,595
14	14	13,32	0,069	0,056	0,101	0,089	0,041	0,024	0,624
15	15	13,70	0,060	0,052	0,100	0,080	0,040	0,022	0,649
16	16	14,08	0,052	0,049	0,098	0,073	0,039	0,021	0,670

Графическое отображение изменения вероятностей состояний, полученное по окончании параметрической идентификации, представлено в приложении III

(точками отмечены значения вероятностей состояний продукта, полученные экспериментальным путем).

Сравнительный анализ результатов, полученных в ходе экспериментального исследования гранулирования полидисперсных материалов (таблица 5.2), и результатов моделирования данного процесса (таблица 5.6 и рисунки П.1-П.7) показал, что полученная математическая модель процесса гранулирования полидисперсного материала с допустимой погрешностью отображает процессы, происходящие при гранулировании инстантированных полидисперсных материалов в тарельчатых грануляторах, снабженных активатором. Возрастание концентрации крупных гранул, происходящее на 15–16-х минутах протекания процесса окатывания связан с большими значениями влажности исходного материала (больше 13,5%), это ведёт к снижению выхода готового продукта (P_7).

Этап три. На данной стадии параметрической идентификации модели был использован массив данных о воздействии конструктивных параметров гранулятора и режимов его работы, а также фракционного состава, влажности и других параметрах исходной смеси на качество готовых гранул (таблица 5.3). Качество готовых гранул характеризуется следующими параметрами:

- гранулометрический состав конечного продукта, который неразрывно связан с вероятностными состояниями гранул по завершении процесса гранулирования, рассчитываемыми при использовании математической модели динамики данного процесса;

- влагосодержание гранулята, находящееся в зависимости от начального влагосодержания исходной полидисперсной смеси и количества жидкой фазы, поступившей через форсунку при распылении в аппарат, и может быть рассчитано по выражению (4.6);

- плотность готовых гранул, можно определить с использованием общеизвестных методик [137,323.355].

Порядок сопоставления результатов математического моделирования и объёма данных, полученных экспериментальным путём, и процедура

количественной оценки адекватности полученной математической модели по многим моментам сопоставима с приведённой выше методикой определения коэффициентов динамики (K_{ij}), однако при этом имеются и некоторые отличия.

В связи с тем, что вероятность состояний многокомпонентной смеси и её влагосодержание испытывают непрерывное изменение в ходе процесса гранулирования, то решение уравнений математической модели превращается в процесс многошаговых вычислений для этих показателей. При этом продолжительность процедуры вычислений определяется продолжительностью процесса гранулирования, которое указано в объёме экспериментальных данных (таблица 5.2).

Совместно с проведением оценки адекватности математической модели, на третьем этапе идентификации осуществлялась корректировка коэффициентов ($K_{v2}, \dots, K_{v6}, K_{p2}, \dots, K_{p6}, \dots, K_{t1}, \dots, K_{t6}, K_w, K_K, K_n, K_s, K_y, K_z$), входящих в выражения, показывающие связь интенсивности переходов материала из одного состояния в другое. Перечисленные выше коэффициенты имеют важное значение для описания процесса гранулирования, т.к. они определяют влияние различных параметров, таких как конструктивных, режимных, комкуемость, влажность материала и т.д. как на ход процесса гранулирования, так и на качество получаемого конечного гранулята. Числовые значения этих коэффициентов определялись на этапе предварительных исследований процесса гранулирования инстантированных полидисперсных материалов по экспериментальным данным и основываясь на аналитических расчетах, при этом, на втором этапе идентификации они оставались неизменными. На рисунке 5.28 представлена блок-схема алгоритма коррекции параметрических коэффициентов.

Данные коэффициенты показывают, какое влияние оказывают конструктивные размеры гранулятора и режимы его работы, а также параметры гранулируемой смеси на параметры качества полученных гранул.

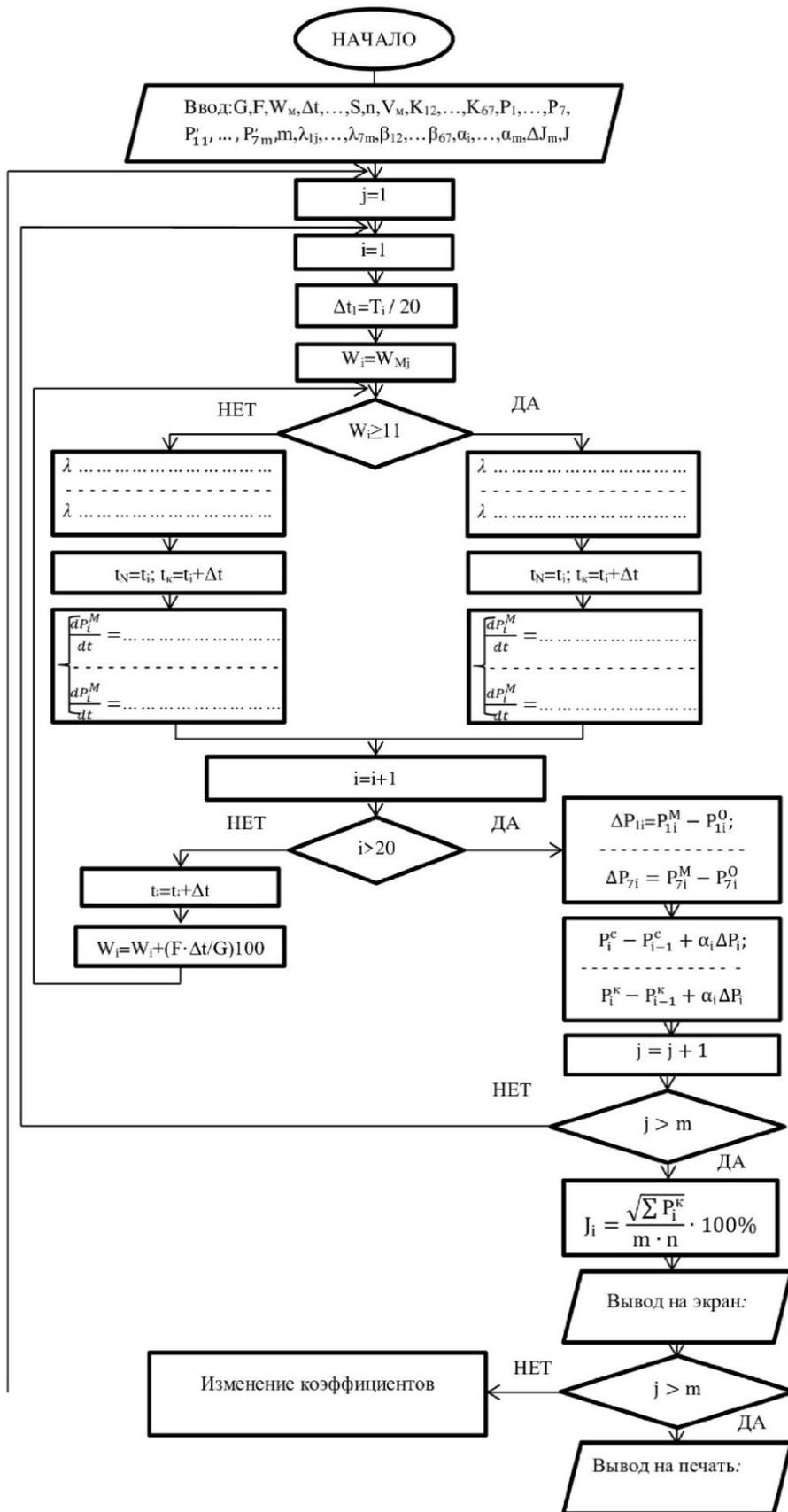


Рисунок 5.28 – Блок-схема алгоритма коррекции параметрических коэффициентов

Изменение данных параметрических коэффициентов осуществлялось в интерактивном режиме при участии эксперта, производившего сравнение данных, полученных опытным путем (таблица 5.2), с расчетными данными, полученными в результате реализации математической модели. Решение о завершении процесса уточнения параметрических коэффициентов принималось экспертом. Экспертная оценка о прекращении процесса уточнения была обусловлена значительным количеством факторов, влияющих на процесс гранулообразования

С помощью уравнения (5.9) была рассчитана корреляционная зависимость диаметра тарели с углом её наклона и линейной скоростью. Необходимость данного расчёта была обусловлена тем обстоятельством, что именно тарель является одним из наиболее важных конструктивных параметров гранулятора, снабжённого активатором, при определении интенсивности перехода формируемых гранул из одного состояния в другое.

В случае изменения какого-либо одного из конструктивных параметров гранулятора или изменения режима его работы, для соблюдения параметров режима перекачивания формируемых на тарели гранул необходимо обеспечить изменение других (оставшихся) параметров в такой мере, чтобы условие в выражении (5.9) выполнялось. Зная значения коэффициента трения качения исследуемой полидисперсной смеси с известным средним размером гранулы, и воспользовавшись экспериментальными данными, полученными при окатывании исследуемого материала, получаем уравнения корреляции, связывающие диаметр рабочей тарели с её углом наклона и частотой вращения тарели.

При использовании в качестве исходного сырья гранулята с содержанием гранул размером 1 мм 70 – 80 %, осуществлении режима перекачивания перерабатываемых гранул, и при свободном расположении гранулообразующих зон были получены следующие значения для конструктивных параметров тарельчатого гранулятора и параметров режима процесса гранулирования: диаметр тарели – 0,8 м., угол наклона тарели – 30 градусов, скорость вращения тарели – 30 об/мин.

Исходя из положения о том, на практике размерность скорости вращения тарели – это число оборотов в единицу времени, угловая скорость тарели в выражении (4.10) была заменена на её число оборотов в минуту. После подставки этой величины, а также значений постоянных величин и приняв во внимание, что ускорение свободного падения для широты г. Кемерово составляет $9,81 \text{ м/с}^2$, уравнение (5.9) примет следующий вид:

$$f = 0,001 \operatorname{tg} \alpha - 2,7918 * 10^{-7} DN^2 / \cos \alpha \quad (5.25)$$

Коэффициент трения качения равный $0,0003453$, $1/\text{м}$ был вычислен путем подстановки в выражение (5.25) конструктивно-режимных параметров гранулятора.

Используя выражение (5.25) можно получить зависимость диаметра тарели гранулятора от угла его наклона и частоты вращения тарели (5.26), а также зависимость числа оборотов тарели от диаметра и угла наклона тарели (5.27).

$$D = (3581,918 / N^2)(\sin \alpha - 0,3453 \cos \alpha); \quad (5.26)$$

$$N = \sqrt{(3581,918 / D)(\sin \alpha - 0,3453 \cos \alpha)}; \quad (5.27)$$

Используя процедуру итерации, был установлен угол наклона тарели для заданного диаметра тарели и частоты её вращения. Угол наклона тарели изменяли с шагом – 1 градус отталкиваясь от минимального значения, равного 25 град., до угла, при котором осуществляется выполнение следующего условия:

$$(\sin \alpha - 0,3453 \cos \alpha) \geq 0,000279 DN^2. \quad (5.28)$$

По завершении третьего этапа процедуры идентификации математической модели были определены уточненные величины параметрических коэффициентов, которые представлены в таблице 5.7.

Выполнив коррекцию параметрических коэффициентов в соответствии с заданным алгоритмом (рисунок 5.28) эти новые значения были введены в математическую модель динамики процесса, после чего осуществлён поиск новых, уточненных значений коэффициентов динамики посредством программы [142].

Таблица 5.7 – Уточненные значения параметрических коэффициентов

K_{v2}	K_{v3}	K_{v4}	K_{v6}	K_{p2}	K_{p3}	K_{p4}	K_{p6}	K_w	K_k
0,03	0,02	0,006	0,0003	105,0	100,0	95,0	2,5	0,00007	0,00005
K_{t1}	K_{t2}	K_{t3}	K_{t4}	K_{t5}	K_{t6}	K_n	K_s	K_z	K_y
0,008	0,006	0,03	0,04	0,03	0,04	0,7	7,5	0,56	0,5

В таблице 5.8 приведены числовые значения коэффициентов, а вероятностные состояния полидисперсной смеси, полученные в результате вычислений по завершению процесса идентификации представлены в таблице 5.9.

Таблица 5.8 – Уточненные значения коэффициентов динамики K_{ij} после второго цикла уточнения

K_{12}	K_{13}	K_{14}	K_{15}	K_{16}	K_{23}	K_{34}	K_{46}	K_{76}	K_{61}
0,444	0,398	11,22	26,54	45,62	29,43	80,78	19,53	1,423	1,514
K_{62}	K_{63}	K_{64}	K_{67}	K_{25}	K_{52}	K_{53}	K_{47}	K_{57}	
0,930	0,471	2,389	41,81	19,79	30,74	1.961	56,06	24,74	

Графическое отображение изменений вероятностей состояний (модель) представлено на рисунке 5.29.

Процесс вычислений значений коэффициентов, представленных в таблице 5.8, включал в себя 18 итераций. При этом заданное расхождение между значениями критерия близости на двух смежных циклах вычислений (ΔJ^D) составляло 0,0006%, при коэффициенте $\beta_{ij} = 0,1$ величина критерия близости экспериментальных и модельных значений вероятностей состояний полидисперсного продукта после завершения процесса вычислений (J) – 0,678%.

Результаты моделирования процесса гранулирования полидисперсных продуктов при характеристиках и значениях конструктивно-режимных параметров, приведенных в таблице 5.3, показаны в таблице 5.10.

Таблица 5.9 – Результаты моделирования динамики процесса гранулирования после второго цикла уточнения коэффициентов

№ опыта	t, мин	W, %	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
1	1	8,38	0,907	0,093	0	0	0	0	0
2	2	8,76	0,832	0,108	0,059	0	0	0	0
3	3	9,13	0,769	0,104	0,094	0,031	0	0	0
4	4	9,52	0,675	0,100	0,097	0,122	0	0,001	0,003
5	5	9,90	0,530	0,093	0,095	0,232	0	0,018	0,029
6	6	10,28	0,388	0,087	0,094	0,263	0	0,064	0,103
7	7	10,66	0,295	0,085	0,096	0,235	0	0,082	0,208
8	8	11,04	0,244	0,084	0,100	0,203	0	0,067	0,305
9	9	11,42	0,170	0,078	0,102	0,174	0,053	0,052	0,374
10	10	11,80	0,133	0,073	0,103	0,148	0,048	0,041	0,457
11	11	12,18	0,110	0,068	0,103	0,128	0,045	0,034	0,516
12	12	12,56	0,092	0,064	0,102	0,112	0,043	0,029	0,560
13	13	12,94	0,079	0,060	0,102	0,099	0,042	0,026	0,595
14	14	13,32	0,069	0,056	0,101	0,089	0,041	0,024	0,624
15	15	13,70	0,060	0,052	0,100	0,080	0,040	0,022	0,640
16	16	14,08	0,052	0,049	0,098	0,073	0,039	0,021	0,631

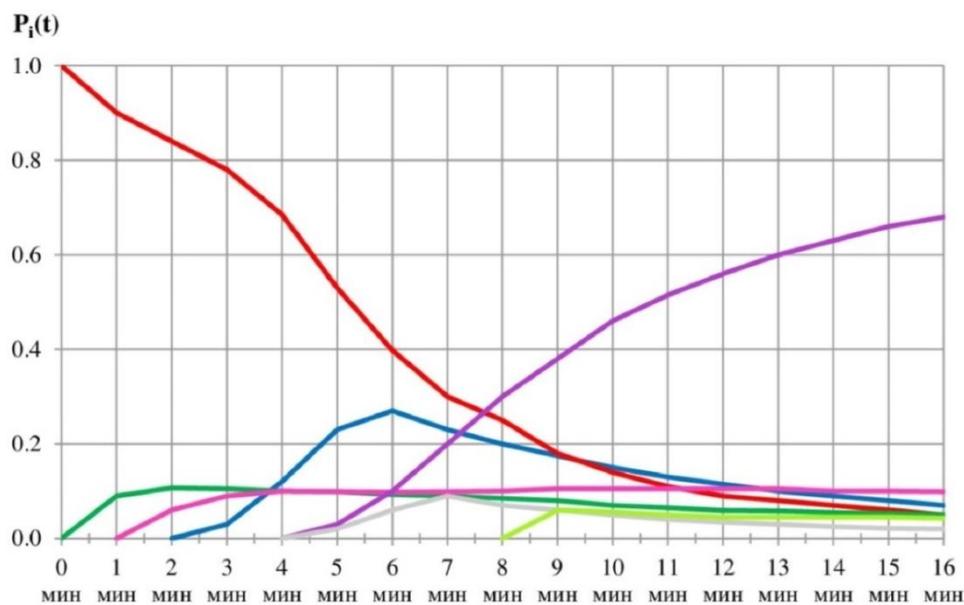


Рисунок 5.29 – График изменения вероятности состояния полидисперсного продукта в процессе гранулирования после второго цикла уточнения коэффициентов динамики

Таблица 5.10 – Результаты моделирования процесса гранулирования полидисперсных материалов при различных значениях конструктивно–режимных параметров аппарата и характеристик исходного продукта

№ опыта	W_m , %	α , град	N , об/м	n , об/м	K	F , кг/мин	Δt_w , мин	P_{oc}	P_6	P_7
1	8	45	28	2000	0,75	0,15	1	0,25	0,19	0,66
2	8	45	24	1800	0,70	0,12	0	0,19	0,29	0,50
3	9	45	28	2000	0,80	0,20	1	0,11	0,11	0,78
4	9	45	32	1800	0,70	0,10	0	0,28	0,15	0,57
5	10	40	28	1900	0,75	0	0	0,32	0,19	0,49
6	10	50	28	2000	0,80	0,05	0,5	0,08	0,14	0,78
7	10,5	45	28	2000	0,75	0,05	0,5	0,07	0,17	0,76
8	11	50	28	2000	0,75	0,02	0,5	0,11	0,15	0,74
9	12	45	32	1900	0,80	0	0	0,19	0,19	0,62
10	12	45	28	1800	0,70	0	0	0,25	0,17	0,58
11	14	45	28	1800	0,65	0	0	0,30	0,19	0,51
12	14	50	28	1700	0,70	0	0	0,38	0,23	0,39

Конструктивные параметры гранулятора и режимы его работы, по данным, приведенным в литературных источниках [22,25136,229,263,266,293-296,300,322,345,355,378], не являются доминирующими при определении эффективности процесса гранулирования. В большей степени эффективность зависит от фазового и структурного состава, а также характеристик гранулируемого материала.

В. И. Коротичем [137] было отмечено, что эффективность процесса образования гранул в грануляторах в большой степени зависит от фазового состава гранулируемой смеси, особенно от содержания мелкодисперсной составляющей. Комкуемость смеси резко снижается при большом содержании крупной фракции. Однако мелкодисперсная фракция при увлажнении легко коагулируется, тем самым резко снижая свою способность к гранулообразованию окатыванием. Таким образом, обеспечение эффективного проявления ван-дер-ваальсовых сил, т.е. более тесного контакта частиц комкуемого материала,

должно быть обеспечено оптимальное соотношение гранул крупной и мелкой фракций.

Процесс гранулообразования в значительной степени зависит как от водно-физических свойств гранулируемой смеси (гигроскопичность, капиллярная влагоемкость и скорость капиллярного влагообмена), так и от её структурно-механических характеристик. От этих свойств, а они определяют процентное соотношение твердой, жидкой и газообразной фаз гранулируемой смеси, зависит её (смеси) способность к агломерированию, т.е. образованию гранул, обладающей необходимой прочностью.

При определении оптимальных конструктивных параметров тарельчатого гранулятора с активатором, а также режимов его работы также необходимо выполнять, учитывая способность полидисперсной смеси к агломерированию, а также её влажности. Для каждой партии гранулируемой смеси, имеющей состав, структуру и технологические свойства, отличные от смеси, которая проходила процесс гранулирования в предыдущий период, определяется оптимальное значение показателя комкуемости, а также оптимальные конструктивные параметры тарельчатого гранулятора с активатором и режимы его работы

В приложении IV приведен пример такого итерационного расчета, а также программное обеспечение системы оптимального управления процессом и проектная документация.

Были разработаны алгоритмы и программное обеспечение параметрической идентификации процесса гранулирования полидисперсных продуктов в тарельчатых грануляторах с активатором. Результаты расчетов и проверка по критериям сходимости показали адекватность постулированной математической модели реальному исследуемому процессу гранулирования.

Глава 6. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БЛОКОВ ПРОИЗВОДСТВА ГРАНУЛИРОВАННЫХ СЫВОРОТКОСОДЕРЖАЩИХ НАПИТКОВ

Наше собственное исследование технологических потоков, а также проведенный ранее в главе 1 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 определяет потребитель, два взаимосвязанных цикла, технологический и эксплуатационный – будут являться подсистемами модели технологического потока. Модель такой системы представлена на рисунке 6.1.

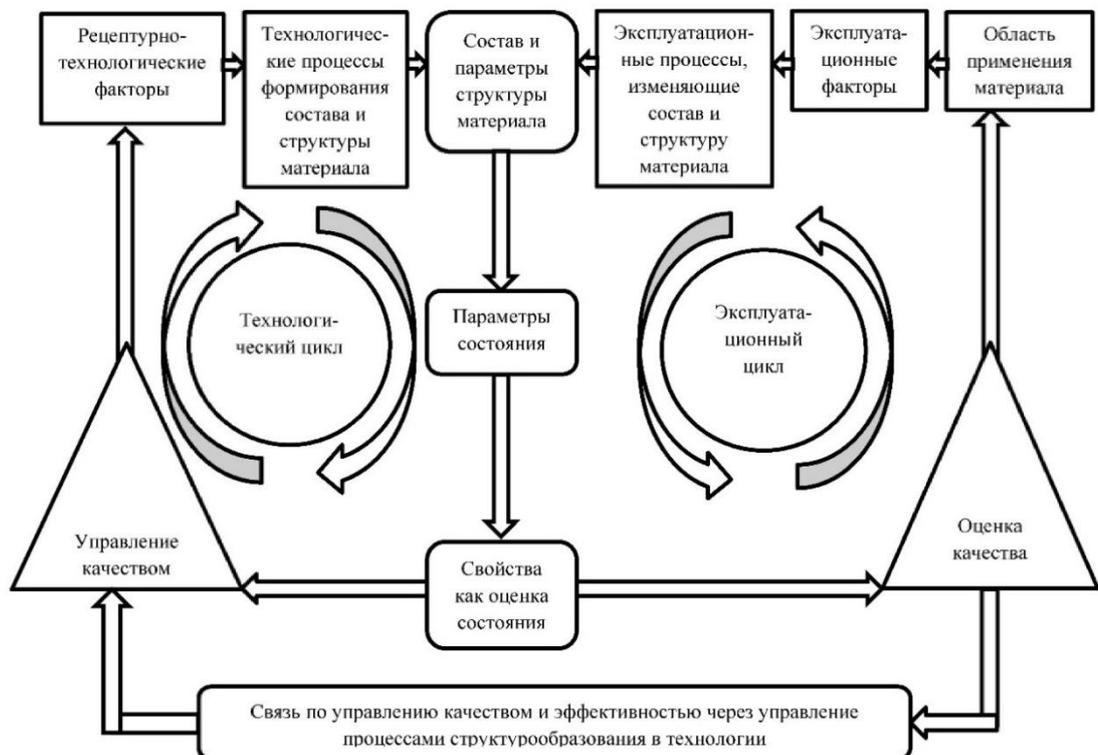


Рисунок 6.1 - Модель управления качеством многокомпонентных полидисперсных продуктов

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.

В данной главе предлагается методика построения таких потоков с использованием информационных моделей модулей (блоков). Такой подход, на наш взгляд, позволяет уже на стадии проектирования учесть синергетику процессов, отсеять или заменить устаревшие (с появлением новых технологий) процессы и даже изменить концепцию производства.

Сложные производственные, научные и научно-производственные системы (производства) могут иметь в своем составе отдельные производства (подсистемы), системы (подсистемы) технологических воздействий, системы (подсистемы) окружающей среды, влияющей на производство, отдельные модули и процессы, а также модули для установления корреляционных зависимостей всех этих подсистем, её формирование и исследование создают предпосылки для создания научных основ технологического обеспечения формирования 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, представлен на рисунке 6.2.

Все составляющие названных систем должны соответствовать требованиям, которые предъявляются к качеству сырья, оборудования (проектируемому или имеющемуся), безопасности конечного продукта и его качеству, принципам модульности, 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.

Создание системного подхода к решению таких многомерных, многовариантных задач, их анализ и синтез дает возможность для создания алгоритмов решения, а также осуществить математическое моделирование для исследования как имеющихся, так и проектируемых систем (подсистем).

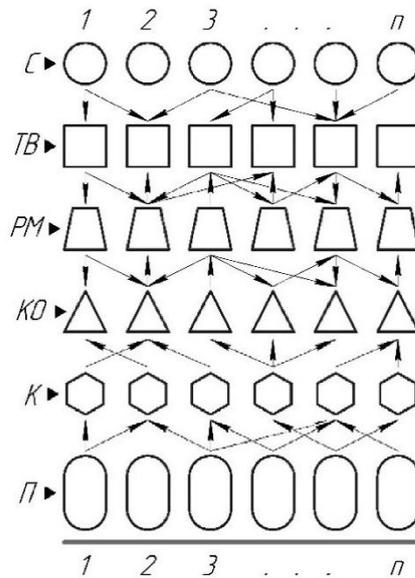


Рисунок 6.2 - Развёрнутый граф структуры взаимодействия трёх систем $C - ТВ - РМ$: C - среда; $ТВ$ – технологические воздействия; $РМ$ – операторы технологической операции; $КО$ – комплекс оборудования; $К$ – компоненты технологического блока; (процессоры); $П$ – аппаратное оформление процесса; n – признаки элементов систем.

Многомерность, поливариативность поставленной задачи, принимая во внимание значительное количество переменных параметров, оказывающих непосредственное влияние на функционирование создаваемого технологического потока, предопределяет настоятельность разработки информационной модели технологического блока, его логики и структуры.

Были определены задачи исследования:

- разработать информационную модель технологического блока, его структуру и вид с целью разработки и последующей реализацией логики синтеза созданной модели.

- разработать теоретические основы обеспечения заданных параметров качества функциональных элементов путём выявления закономерностей влияния

отдельных систем (потребительской среды, среды технологических параметров и среды отказов) на надежность и качество рабочих модулей, технологического оборудования

Системный подход к обоснованию методологии создания и объективной оценке задаваемых параметров качества даёт возможность осуществить выбор методов, средств технологического воздействия и оборудования для их осуществления.

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 может быть представлено следующим выражением [143]:

$$\bar{S}(R, \sigma, \alpha, \beta, \gamma) \cdot \bar{V} = \bar{K} \cdot a, \quad (6.1)$$

где: \bar{S} - вектор-функция, описывающая распределение показателей качества;

R и β - обобщенные органолептические показатели качества (данные показатели также включают и микробиологическую составляющую готового продукта);

σ - обобщенный показатель межпроцессовых или межмодульных связей;

α - показатель, характеризующий обобщенные физические, химические, физико-химические или иные свойства производимого продукта;

γ - показатель связи внутри производимого продукта (структурообразующие, заполняющие и т.д.) (таблица 6.1 [11]);

\bar{V} - вектор условий эксплуатации или использования;

a - множество методов, используемых в совокупном технологическом процессе формования гранулы;

\bar{K} - вектор состояния.

Таблица 6.1 – Классификация дисперсных систем

Признаки дисперсной структуры	Тип структуры дисперсной системы			
Форма частиц	Изометрическая структура		Анизометрическая структура	
	Шарообразная $v=1$		Пластинчатая $v \ll 1$	Игольчатая $v \gg 1$
Размер частиц	Монодисперсная структура $\psi_1=\psi_2=\psi_3=1$			
	Полидисперсная структура $\psi_1 \neq 1, \psi_2 \neq 1, \psi_3 \neq 1$			
	Грубо-дисперсная $a > 10^{-3}$ см	Тонко-дисперсная $10^{-3} > a > 10^{-5}$ см	Коллоидная $10^{-5} > a > 10^{-7}$ см	Надмолекулярная $a < 10^{-7}$ см
	Частицы не участвуют в броуновском движении		Частицы участвуют в броуновском движении	
Расположение частиц в объеме	Изотропная структура	Ортотропная структура	Анизотропная структура	
Плотность	Сильно разбавленная структура $0 < K_T < 0,25$	Рыхлая структура $0,25 < K_T < 0,50$	Плотная структура $0,50 < K_T < 0,75$	Очень плотная структура $0,75 < K_T < 1,00$
Агрегатное состояние	Структура I-го рода: частицы не взаимодействуют друг с другом	Структура II-го рода: частицы образуют агрегаты		Структура III-го рода: агрегаты образуют флоккулы
Изменчивость параметров	Стационарная (неразвивающаяся) структура		Развивающаяся структура	

Исходя из уравнения (6.1) и приняв как основополагающий фактор вектор внешних воздействий, были произведены расчеты комбинированных методов (физико-механических и физико-химических). Алгоритм расчета приведен на рисунке 6.3.

Предложенный алгоритм основан на методе итерационных изменений вектора внешнего воздействия \bar{K}_o , который соответствует заранее определенному вектору \bar{s} – вектору параметров гранулы (структура гранулы, её дисперсность, рецептурный состав и др.). Кроме того, алгоритм включает в себя блоки,

логические функции, дифференциальные уравнения, а также уравнения, полученные на стадии предварительных экспериментов опытным путем.

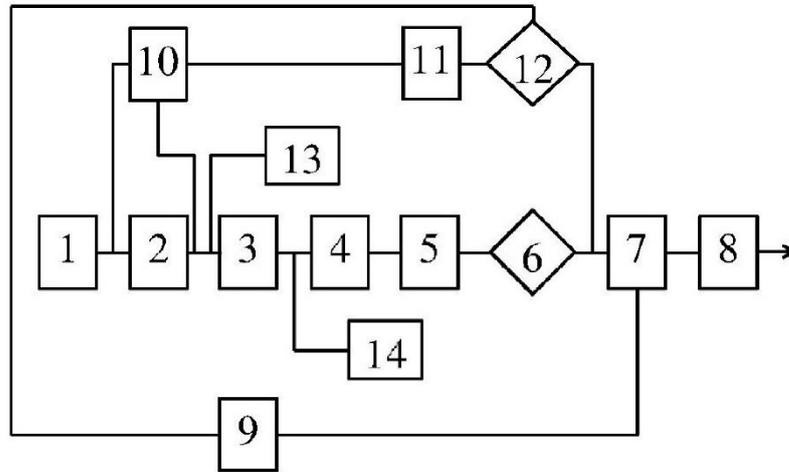


Рисунок 6.3 - Алгоритм расчёта комбинированного физико-химического и физико-механического методов.

Подсистема 1 содержит исходные данные. В данной подсистеме выбирается исходное сырье из анализа требуемого конечного продукта и его структурно-механических и микробиологических параметров.

Подсистема 2 содержит математическое описание изменения структурно-механических и физико-химических свойств продукта на всей технологической линии. Данная подсистема характеризуется вектором \bar{S} . Подсистема 2 состоит из четырех элементов, а именно: элемент, описывающий изменение геометрических и микробиологических параметров объекта в течение его производства параметров; элемент, описывающий изменение фазовых характеристик объекта; третий элемент описывает тепло- массообменные процессы, протекающие в объекте; описывающие создаваемые напряжения.

Подсистема 3 включает в себя промежуточные технологические операции, обусловленные заданной рецептурой производства дисперсных систем, которые задаются вектором \bar{S} .

Подсистема 4 позволяет описать закономерности изменения структуры элемента при обобщенном воздействии на него заданных факторов.

Подсистема 5 включает в себя выходные параметры Z , которые включают в себя свойства готовой продукции, как структурно-механические, физико-химические и микробиологические.

Подсистема 6 включает в себя функцию проверки полученных параметров готовой продукции в сравнении с задаваемыми с использованием вектора \bar{K} . При несовпадении полученных характеристик (параметров) с задаваемыми осуществляется диверсификация вектора \bar{K} .

Подсистема 7. В данной подсистеме происходит дифференциация вектора \bar{K} на составные элементы в зависимости от конкретного метода, структурированные в данном пространно-временном континууме.

Подсистема 8. Назначение данной подсистемы – перевод составляющих вектора K_i в параметры конкретного технологического процесса.

Подсистема 9. В данной подсистеме производится, (с использованием градиентного метода), трансформация вектора \bar{K} с целью получения задаваемых свойств продукта.

Подсистема 10. В данной подсистеме осуществляется корреляция параметров структуры гранулы \bar{S} и вектора внешнего воздействия \bar{K} . Это сравнение происходит на основании изначально полученных эмпирическим путем необходимых коэффициентов.

Подсистема 11, как и подсистема 10, позволяет производить сравнительный анализ \bar{S} с вектором \bar{Z} . Данная подсистема позволяет использовать приближенные зависимости, представляющие собой критерии технологического воздействия в теоретических расчетах для разработки системы технологического потока.

Подсистема 12 включает в себя функцию проверки полученных параметров.

В подсистемах 13 и 14 содержатся дополнительные данные, уточняющие форму, размеры и другие параметры модельного продукта (гранулированного или брикетированного). При выборе таких дополнительных был использован датчик случайных чисел.

Для решения поставленной задачи (задачи формирования свойств будущей гранулы) был введен вектор – вектор состояния. Вектор состояния определяет взаимодействие отдельной гранулы с факторами внешней среды.

Для описания корреляции характеристик вектора состояния с вариативными параметрами гранулы были постулированы математические модели, которые позволили решить энергетические и структурные задачи, а также описать процесс формуемости влагонасыщенных полидисперсных систем.

В связи с тем, что в смеси присутствуют поверхности раздела между отдельными частицами, т.е. система является гетерогенной, данный фактор учитывается при решении энергетических задач. Одной из важнейших характеристик гетерогенности является величина поверхностного натяжения, которая характеризует энергию единицы поверхности. Отсюда составной частью блока 2 (рисунок 6.3), исходя из энергетического анализа, являются зависимости, описывающие происходящие фазовые изменения в динамике с учетом воздействия потоков энергии, имеющих место при осуществлении взаимопревращения структур. К таким взаимопревращениям относятся коагуляционные, кристаллизационные и конденсационные превращения.

Соотношение твердой, жидкой и газообразной фаз в процессе гранулообразования с учетом режимов и параметров исследуемого объекта \bar{V} характеризует интенсивность преобразования влагосодержащих полидисперсных смесей. Данные преобразования могут быть описаны уравнениями, характеризующими изменение структуры полидисперсной смеси исходя из энергетического фактора.

Описание вектора \bar{S} приведено в таблице 1.12 [143].

С помощью такого подхода могут быть созданы комбинации из различных процессов (физико-химических и физико-механических): сушка, прессование, 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.

Критерий эффективности (критерий применимости) может быть определен по формуле:

$$K_m = f(M_d; \Phi_d; D_d; I_d; H_d; \sum_{i=1}^m T_i) \quad (6.2)$$

где: M_d - материал;

Φ_d, D_d - форма и диаметр гранулы;

I_d - влажность гранул; H_d - режимно-конструкционные параметры;

$\sum_{i=1}^m T_i$ - совокупность технологических особенностей данного способа.

Одним из показателей оптимальности наборов операторов является коэффициент качества - K_d :

$$K_d = K_n K_b K_c, \quad (6.3)$$

где: K_n, K_b, K_c - коэффициенты соответственно описывают качество после выхода из смесителя, гранулятора и сушки.

Целесообразность применения того или иного способа определяется технико-экономическим критерием C_b . Данный критерий устанавливает корреляционную связь качественных показателей готового продукта со стоимостью производства.

$$C_b \geq K_d C_n, \quad (6.4)$$

где: C_b - стоимость варианта 1,

C_n - стоимость варианта 2.

Алгоритм создания заранее заданных показателей качества продукта представлен на рисунке 6.4.

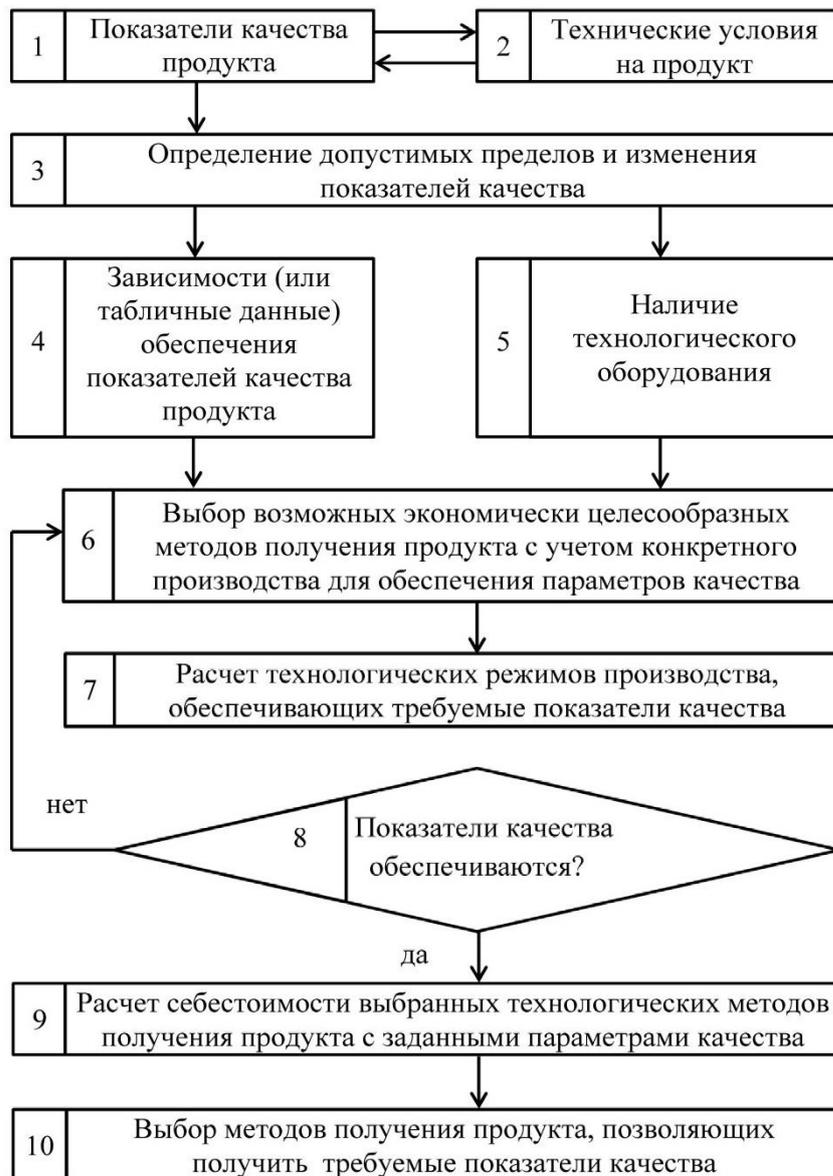


Рисунок 6.4 - Структурная схема решения задачи обеспечения требуемых показателей качества

Блоки представленного алгоритма:

1 – блок органолептических показателей качества продукта; к данным показателям можно отнести такие показатели, как свойства (и в частности структура, физико-механические свойства), пищевая ценность, безопасность продукта, его функциональность и др.

2 – блок составляющих органолептических показателей блока 1; к данным показателям можно отнести такие показатели, как показатели внешнего вида, показатели вкуса, цвета и запаха, энергетическая и пищевой ценность, время растворения и др.

Создание технологического процесса по модульному принципу состоит из следующих основных этапов:

- систематизация технологических процессов гранулообразования;
- оценка процессов с точки зрения технологичности;
- определение порядка осуществления составляющих технологических процессов;
- «компоновка» технологического потока
- проектировка отдельных технологических процессов и процессоров.

Исследования по формированию определенных характеристик гранул в процессе гранулирования не систематизированы, т.е. не создана стройная система, которая позволила бы решать задачи гранулирования с учетом технологических воздействий, параметров исходного материала, условий эксплуатации, типа оборудования и других факторов. Данная работа ставит целью в определённой мере решить эту задачу. На основании выполненного аналитического обзора сформированы следующие задачи исследований:

- определение критериев и идентификация элементов систем среды, изготавливаемого пищевого продукта-гранулы и технологических блоков (ТБ);
- разработка единой системы по созданию и осуществлению задач проектирования и создания процессов с целью обеспечения заранее задаваемых свойств (функциональных, физических, химических, механических) гранулы.
- принимая во внимание взаимосвязи системы среды, системы технологических воздействий и системы технологических процессов, разработать логику создания информационных моделей технологических блоков .
- разработка методологии оптимизации ТБ;
- реализация ТБ – идентификация элементов среды эксплуатации и объектов технологических воздействий;

- установление показателей взаимосвязи функциональных элементов системы среды, системы технологических воздействий и системы технологических процессов;
- разработка методологии синтеза ТБ; создание алгоритма программы работы его информационной модели;
- исследование и разработка методики оптимизации ТБ;
- разработка и реализация банка ТБ.

6.1 Разработка структуры технологического блока

Введем понятие «технологический блок», включающее в себя сочетание таких факторов, как технологическое оборудование, оснастка, технологический поток (по определению В. А. Панфилова). Кроме того, в состав технологического блока включаются и процессы (системы процессов), предназначенные для обеспечения (в том числе и метрологического) получения инстант-продукта (параметры которого задаются на начальных этапах) – сухого гранулированного полидисперсного продукта (системы) (СГПС).

Систему технологического обеспечения качества (ТОК) формования 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 (СГПП) и комплексный показатель качества СГПС - C_x [113], вторая – система среды эксплуатации, третья - виду отказа (рисунок 6.5).

Пользователь этой базы данных должен заполнить три поля (границы) соответствующими кодами из трех систем. Возможно не все поля будут заполнены, потому что не все модули СГПС могут соответствовать определенному типу отказа или задаваемому показателю качества.

Это справедливо и для других составляющих: среды эксплуатации, показателей качества. Осуществляя ввод соответствующих параметров, можно получить ряд технологий получения гранул (таблеток, брикетов и др.).

В этом случае пользователь, задаваясь критерием (критериями) экономичности, может 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) целью.

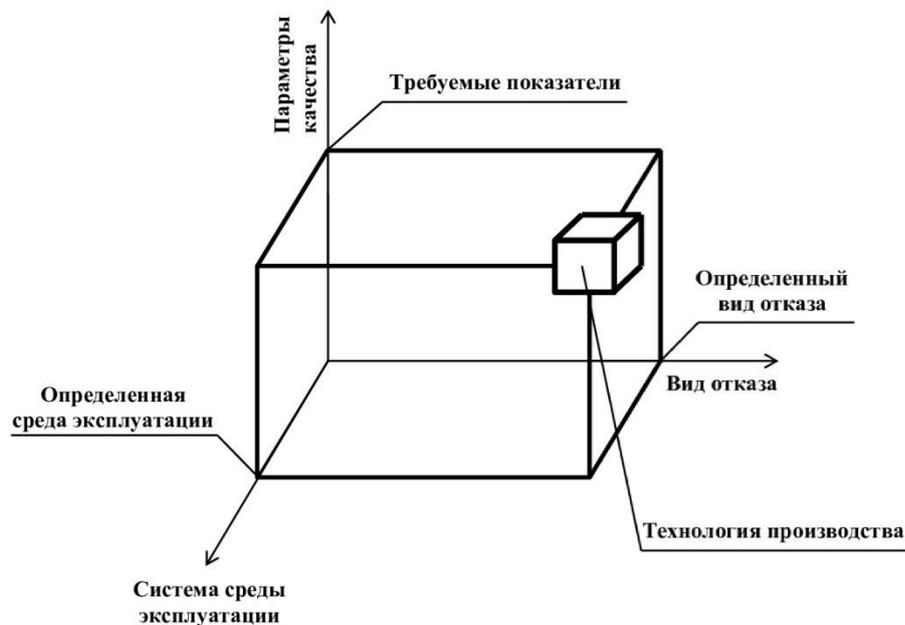


Рисунок 6.5 – Общий вид структурного элемента базы данных для системы технологического обеспечения качества

В соответствии с положениями механики сплошной среды, и принимая во внимание многовариантность и неопределенность процессов, происходящих в пористых средах [4,101,136], для придания определенности системе (в данном случае системы СГПС) необходимо определить показатели, оказывающие непосредственное влияние на характеристики исследуемой системы.

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.

С учетом того, что оптимизация, как правило, обуславливается себестоимостью, примем, что режимы технологических процессов (система среды воздействия – ССВ) будут определяться энергетическими параметрами матрицы технологических воздействий – K

Введем обозначения: C и \mathcal{E} , как части системы среды отказов и системы среды воздействия, которые, соответствующие этапам образования СГПС, а N_i – локальная область части \mathcal{E} системы среды отказов. Параметры, определяющие матрицу технологического воздействия (рисунок 6.6):

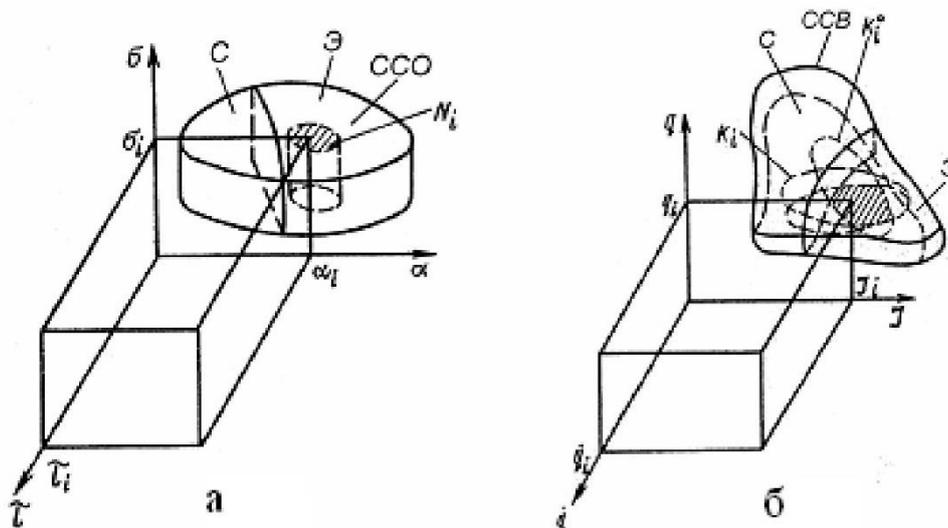


Рисунок 6.6 – Система среды отказа (а) и система среды воздействия (б)

– плотность потока энергии, Дж/м³

$$q = \frac{\varepsilon}{V_0}; \quad (6.5)$$

где: ε – полная энергия внешнего воздействия, Дж;

V_0 – объём формообразуемой массы, м³;

– скорость нарастания плотности потока энергии, Дж/(м³·с),

$$\dot{q} = \frac{\partial q_k(\varepsilon)}{\partial t}, \quad (6.6)$$

где: t – продолжительность воздействия, с;

V – объём объекта воздействия, м³;

q_k – плотность потока энергии воздействия, Дж/м³;

– импульс влияния (воздействия), Н·с,

$$I = \int_0^{t_0} dq dt; \quad (6.7)$$

где: q – плотность потока воздействия, Н;

t_0 – продолжительность воздействия, с.

МТВ (матрица технологического воздействия) оценивалась при следующих условиях: k_i^0 – параметр (матрица) i -го реального сочетания воздействий; k_i^* – параметр (матрица) i -го расчетного сочетания воздействий

Если принять, что система среды отказа и система среды воздействия трёхмерны, то и матрица технологического воздействия может быть реализована как многогранники с трёхмерными координатами q, \dot{q}, I

Введём критерий идентификации сочетаний технологических воздействий:

$$\delta = \left[A_1 \left(\frac{k_1^0 - k_1^*}{k_1^0} \right)^2 + A_2 \left(\frac{k_2^0 - k_2^*}{k_2^0} \right)^2 + A_3 \left(\frac{k_3^0 - k_3^*}{k_3^0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6.8)$$

где: A_1, A_2, A_3 – коэффициенты значимости параметров матрицы технологических воздействий, удовлетворяющие условиям:

$$A_1 + A_2 + A_3 = 1; \quad A_1 > 0; \quad A_2 > 0; \quad A_3 > 0.$$

Оптимальное воздействие, которое обеспечивает распределение величин параметров качества, в общем виде может быть представлено как функциональная зависимость:

$$L(K) = B, \quad (6.9)$$

где: K – матрица технологического воздействия;

B – матрица параметров качества;

L – некоторая функция, характеризующая способ описания процессов.

Основой информационной модели технологического блока является представленное графическое выражение единицы объёма информации (рисунок 6.6).

Цель проводимых исследований – решение задачи:

$$\inf_{N \in CCO} M, L(K) - B = M(N), \quad (6.10)$$

где N - критерий эксплуатации.

Этапы методики проектирования:

1. Принимая во внимание исходные данные (рецептура СГПС, 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:

$$B = \{a_i\}, i = \overline{1, n}, \quad (6.11)$$

где: a_i – определенный параметр качества;

n – число определяющих параметров качества

Матрица B является формальным выражением системы среды отказа, а множество параметров качества a_i – множеством параметров состояния объекта.

Наряду с заданием параметров качества и параметров состояния объекта необходимо установить и эксплуатационный(е) критерий (критерии),

определяемый как число циклов ресурса работы оборудования при разных условиях его эксплуатации.

Такое число, которое соответствует заданному, вполне определенному значению матрицы B , есть выражение функциональной связи критерия эксплуатации $D_{\mathcal{D}}$ и параметрами качества a_i , т.е. $D_{\mathcal{D}} = D\{a_i\}$. Данная зависимость является формальным выражением системы среды отказов в той области, что соответствует показателю критерия эксплуатации (\mathcal{D}).

2. Далее:

а) Из п. 1 выбирается число возможных (реальных) методов, обеспечивающих заданный критерий $D_{\mathcal{D}}$. Примем, что в виртуальном пространстве с декартовыми координатами q, \dot{q}, I каждому методу соответствует виртуальный параллелепипед, имеющий стороны:

$$\left(q_i^{\max} - q_i^{\min} \right) \times \left(\dot{q}_i^{\max} - \dot{q}_i^{\min} \right) \times \left(I_i^{\max} - I_i^{\min} \right),$$

где q_i^{\max} , q_i^{\min} , \dot{q}_i^{\max} , \dot{q}_i^{\min} , I_i^{\max} , I_i^{\min} - соответствующие диапазоны параметров воздействия i -ого реального метода.

Т.е. можно утверждать, что каждый реальный метод соответствует виртуальному параллелепипеду, который есть не что иное, как геометрическое отображение K_i^0 - матрицы воздействия для i -го метода.

После этого по координатам q, \dot{q}, I выбираем $q_0^{\max}, q_0^{\min}, \dot{q}_0^{\max}, \dot{q}_0^{\min}, I_0^{\max}, I_0^{\min}$, которые образуют параллелепипед со сторонами $(q_0^{\max} - q_0^{\min}) \times (\dot{q}_0^{\max} - \dot{q}_0^{\min}) \times (I_0^{\max} - I_0^{\min})$, соответствующий исходной матрице воздействия в области формирования K_c (рисунок 6.7); параллелепипед включает в себя K_i^0 (рисунок 6.7-б);

б) Аналогично рассмотрим внешние воздействия в области формирования гранулы. В результате по литературным данным и полученным в п.1 реальным эксплуатационным воздействиям K_{i3}^* строим часть ЭССВ ($ССВ_{\mathcal{D}}$), охватывающую

эти K_{i3}^* , которая является частью первичной (или исходной) матрицы технологического воздействия – K_3 .

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 объединённых параллелепипеда, определяемых K_Φ и K_3 (рисунок 6.7-в);

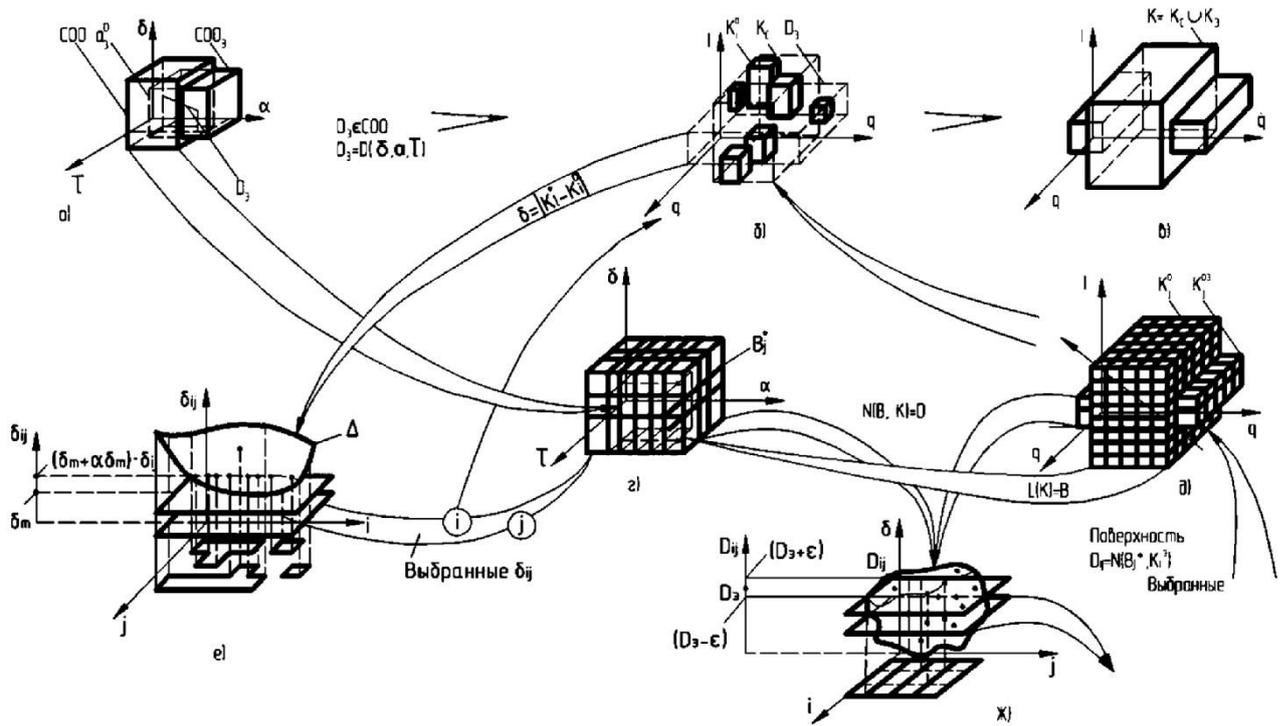


Рисунок 6.7 - Схема проектирования сочетаний воздействий

в) произведем деление (дискретизацию) систему среды воздействия с определенным шагом. Это соответствует делению параметров исходной матрицы K с некоторым базовым шагом – шагом по параметру q . Для того, чтобы выполнить условие равенства количества точек (имеющих дискретный характер), находящихся на координатных осях ССВ (системы среды воздействия), шаги дискретизации этих точек по параметрам q и J принимаются как производные от параметра q . Обязательным условием при выборе шага дискретизации является условие тождественности точности принимаемых исходных данных точности данных существующих реальных методов.

Тогда система среды воздействия и её отображение - матрица K разбивается «сеткой» выбранного базового шага. В узлах этой «сетки» определяются совокупности значений:

$$\{q_j; \dot{q}_j; I_j\} = K_j^*.$$

где: K_j^* - расчётная МТВ (рис. 3.3-д);

$j = \overline{1, n}$ (n – число дискретных точек в зависимости от шага по q);

г) Решим обобщающую задачу, применительно к каждому из расчётных методов воздействия:

$$L(K_j^*) = B_j^*, \quad (6.12)$$

где L – обобщённая функциональная зависимость параметров воздействия и параметров качества, представленная в виде математических моделей физико-химического, механического воздействия, явления массопереноса на параметры качества модели объекта.

Каждая точка K_i^* (принадлежащая среде воздействия) в приведенной обобщенной корреляционной зависимости между параметрами воздействия и параметрами качества, имеет в системе среды отказа соответствующую точку B_i^* . Пространство системы среды отказа имеет расчетные параметры качества.

Примем во внимание, что множество точек B_i^* назначаются для реально существующих методов, т.е. находятся в широком диапазоне параметров воздействия. Тогда множество расчетных матриц B_i^* объекта (параллелепипеда) по наибольшим и наименьшим значениям B_i^* больше и охватывает матрицу B (см. п. 1);

д) Решается обобщенная задача. Применив для каждого из расчетных объектов, решим обобщённую задачу, принимая во внимание, что B_i^* является характеристикой модели объекта, которая формируется K_i^* воздействием:

$$N(B_j^*, K_{j,\varepsilon}^*) = D_{ji}, \quad (6.13)$$

где N – обобщенная функциональная зависимость параметров качества и критерия восстанавливаемости киселя, представленная в виде математических моделей эксплуатационных воздействий: различные виды процессов, расчет показателей качества киселя и т.п.

Доминирующими факторами при этом будут являться:

- B_j^* – характеристики модели объекта);
- K_j^* – характеристика модели воздействия среды эксплуатации.

Решением будет являться определение расчетного критерия получения киселя в виде, готовом для приема в пищу D_j ;

е) совокупность значений K_j^* , использованных в п.2 -г, и соответствующие им D_j , рассчитанные в п. 2 - д через B_j^* и K_j^* , образуют таблицу зависимостей D_j от K_j^* (таблица 6.2).

Таблица 6.2 – Расчётные значения матрицы технологического воздействия и критерия эксплуатации

J	q, Дж/м ³	q̇, Дж/м ³	I, Н*с	D _j
47	4,00*10 ⁵	1*10 ³	1	0,129
48	4,39*10 ⁵	1.7*10 ³	1	0,131
49	4,00*10 ⁵	1*10 ⁴	1	0,495
731	3,07*10 ⁶	2*10 ²	5	0,48
732	3,80*10 ⁵	2*10 ²	5	0,49
733	1,45*10 ³	2*10 ²	5	0,53

Из данной таблицы выбираем значения D_j , удовлетворяющие условию $|D_0 - D_j| < \varepsilon$, (где ε — погрешность выбора расчетного критерия эксплуатации, принимается равной ~ 0.05);

ж) по таблице 6.3 в соответствии с D_j (см. п. 2-е) определим значения K_j^* . Данные значения являются значениями матрицы расчетного воздействия, обеспечивающие заданный расчётный критерий эксплуатации D_p , который может быть определен как расчётный уровень долговечности.

з) континуум K_i^0 , (см. п. 2-а) матриц для реального метода СГПС, приведена в таблице расчетных значений (таблица 6.3).

Таблица 6.3 – Исходные параметры внешнего воздействия

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

Из п. 2-ж (таблица 6.3) выбираем значения K_j^* , а из п 2-а - K_j^0 . После этого 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 .

Нижняя грань множества Δ определяется при решении экстремальной задачи $\inf \Delta(\delta_{ij})$ при условии: $\delta_{ij} \in [\delta_m; \delta_m + \alpha\delta_m]$; $\delta_{ij} \in CCB$, (где α – величина, являющаяся функцией от δ_m ; δ_m – величина, компенсирующая метода и идентификации на предшествующих стадиях расчета)

Тогда, учитывая погрешности α , производится выбор наименьших значений δ_{ij} , которые 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.

Задавая номер j (таблица 6.2) выбираем значения K_j^* , с параметрами $\{q_j; \dot{q}_j; I_j\}$.

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. Изучаются параметры качества сформированных сочетаний по критерию стендовой, натурной картине показателей качества, рассчитываем соответствующие процессы, режимы процессов, разрабатываем оборудование.

6.2 Формирование и оптимизация виртуальной информационной модели технологического блока формообразования гранул сывороткосодержащих пищевых концентратов

Для того, чтобы представить, каким образом 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 [169, 171,192].

На начальных этапах моделирования необходимо задать критерии и определить индексы систем среды эксплуатации (ССЭ), изготавливаемого изделия (МП), среды воздействия (ССВ), системы отказов (ССО).

Все функциональные элементы технологии производства гранул формируются из 11 простых блоков (рисунок 5.24):

Существующие в реальных производственных условиях среда эксплуатации, материал и качество исходного сырья, технические условия производства и другие факторы взаимодействуют между собой, а, следовательно, создаются условия (причины) появления отказов различной природы и интенсивности.

На рисунке 6.8 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 алгоритмическую формализованного (автоматизированного) подбора (выбора) технологического блока (блоков), который решает проблему производства данного изделия при обеспечении наилучших экономических показателей конкретных условий производства. Производство осуществляется по схеме, показанной на рисунке 6.8:

- 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);



Рисунок 6.8 – Схема ранжированной последовательности формирования информационной модели технологического блока

– 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)

Параметр C_x рассчитывается или определяется опытным путем.

Создание исходной информационной модели ТБ производится в следующей последовательности:

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

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

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.).

Коды выходных величин (а в данном случае это параметры выпускаемого продукта) включают в себя код рецептурно-технологических параметров конечного продукта, коды технологических подсистем (обозначим их как МП), и процессоров, входящих в эти подсистемы (обозначение – МС), характер, вид и пределы изменений параметров [164,174]. Идентификация отдельных элементов системы среды эксплуатации и системы конечного (выпускаемого продукта) производится с учетом структуры гранулы (таблетки). Выполнение данного условия производится с помощью комплексного параметра качества для оценки равновесного состояния «п».

С помощью этого параметра могут быть идентифицированы все подсистемы и процессоры технологического потока.

Для оценки способов получения гранул на основании проведенного анализа литературных источников, а также собственных научно-исследовательские работ был выбран обобщённый технико-экономический критерий (показатель):

$$G_i = \frac{C_{B_i}}{K_{D_i}} \rightarrow \min ; \quad (6.14)$$

$$G_i = \frac{C_{B_i} + E_H K_{уд_i}}{K_{D_i}} \rightarrow \min ; \quad (6.15)$$

где: C_{B_i} - удельная себестоимость способа формообразования гранул i -м способом, руб./м² ;

K_{D_i} - коэффициент качества, при i -м способе;

E_H - нормативный коэффициент эффективности;

$K_{уд_i}$ - удельные капитальные вложения при i -м способе, руб./м² .

Способ получения гранул, имеющий минимальное значение G_i , – оптимален. Расчет оптимальных G_i , (формулы (6.14) и (6.15)) проводится для каждого продукта. Показатели C_B и K_D из выражений (6.14) и (6.15) имеют равную значимость, однако, в условиях реального производства, а также учитывая тенденции развития технологических потоков, можно говорить о неравноценной значимости данных показателей.

Осуществив определение технологических затрат, а также установив значения коэффициентов надежности, производится расчет значений критерия экономической эффективности.

При рассмотрении влияния годовой программы производства продукции на себестоимость производства и при выборе способа получения все учитываемые расходы делятся на переменные расходы ($C_{ПЕР}$), которые зависят от программы (N), и постоянные ($C_{П}$), которые не зависят от объёма производства. Влияния годовой программы производства продукции на себестоимость можно определить как:

$$C_B = C_{ПЕР} N + C_{П} ; \quad (6.16)$$

Оценка способа формообразования гранул производится с помощью технико-экономического критерия. При расчёте данного критерия наряду с себестоимостью процессов производства во внимание принимаются также и прямые и косвенные расходы по подготовке таких производств [141]; на данном этапе в связи с тем, что исследования проводились на существующем оборудовании, во внимание принимались только текущие затраты.

Обоснования рациональных (оптимальных) способов производства какого-либо изделия применительно к современным условиям изложены в работах профессора А. Н. Батищева [141], А. М. Попова [241]. А. Н. Батищевым предложено оптимизировать технологический процесс по энергетическому критерию, учитывающему коэффициент, учитывающий качество продукта и все энергозатраты, начиная от производства необходимых материалов и кончая окончательной обработкой готового изделия, в нашем случае гранулы:

$$\varphi_{Эi} = \frac{K_{1i} K_{2i}^2}{K_{Дi}} \rightarrow \min ; \quad (6.17)$$

где K_{1i} , K_{2i} – коэффициенты энергоёмкости и трудоёмкости формообразования гранул i -м способом

Исходя из экономических интересов конкретного предприятия были предложены пути оптимизации способов образования гранул по комбинированному (комплексному) критерию, который учитывает затраты, энергоёмкость, коэффициент долговечности и коэффициенты экономичности:

$$K_{Эi} = \frac{K_{1i} K_{2i} K_{3i} K_{4i} K_{Mi}}{K_{Дi}} ; \quad (6.17)$$

где K_{3i} , K_{4i} – коэффициенты энергоёмкости и трудоёмкости работ по обеспечению технологической безопасности технологического процесса;

K_{Mi} – коэффициент материалоемкости.

Для определения коэффициентов K_1, K_2, K_3, K_4 за базу принимается один из наиболее прогрессивных способов формообразования гранул. Данный критерий по сравнению с технико-экономическим даёт наиболее объективную оценку

эффективности способов. Методы формообразования гранул лучше обосновывать комплексным критерием, который считает минимальные удельные затраты на каждую единицу работы. Выбранные способы ранжируются исходя из весомости комплексного критерия способа.

Принимая во внимание условия гранулирования, влияние значительного числа факторов на условия формообразования, комплексный критерий даёт возможность объективно оценить выбранный способ гранулирования для получения требуемых параметров полученных гранул.

$$C_{Bi} = \frac{\sum G_i}{T_i}; \quad (6.18)$$

где: $\sum G_i$ - сумма всех затрат при принятом способе формообразования;

T_i - фактический срок хранения киселей.

Принимая во внимание, что при организации пищевых производств требования к экологической безопасности со временем только возрастают, что ведет к возрастанию основных и оборотных средств, затрачиваемых на производство, определение оптимального способа гранулирования производится с использованием более «полного», комплексного критерия, который условно можно назвать комплексным технико-, эколого-экономическим:

$$G_i = \frac{(C_i + C_{Эi})N_i + E_H(K_i + K_{Эi})}{T_{Bi}} \rightarrow \min; \quad (6.19)$$

где: C_i - себестоимость процесса i -м способом, руб./ед. прод.;

$C_{Эi}$ - затраты на экологическую безопасность процесса i -м способом, руб./ед. прод.;

E_H - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений ($E_H = 0,15$);

K_i - капитальные вложения на организацию технологического потока i -м способом, руб./ед. прод.;

$K_{Эi}$ - капитальные вложения на организацию работ по экологической безопасности i -м способом, руб./ ед. продукта.;

$T_{Ви}$ - фактический срок хранения гранул, созданных i -м способом;

N_i - объём производства принятым способом.

Такой критерий позволяет говорить о нём, как о технико-экономической модели, которая достаточно полно учитывает затраты на единицу производимой продукции. Недостатком такой модели является тот факт, что оптимальный с экономической точки зрения способ может проигрывать другим способам с точки зрения производительности или обеспечения качества полученного продукта.

Математическая модель (6.9) легла в основу разработанного алгоритма оптимизации выбора способа формообразования гранул; блок-схема такого алгоритма показана на рисунке 6.9.

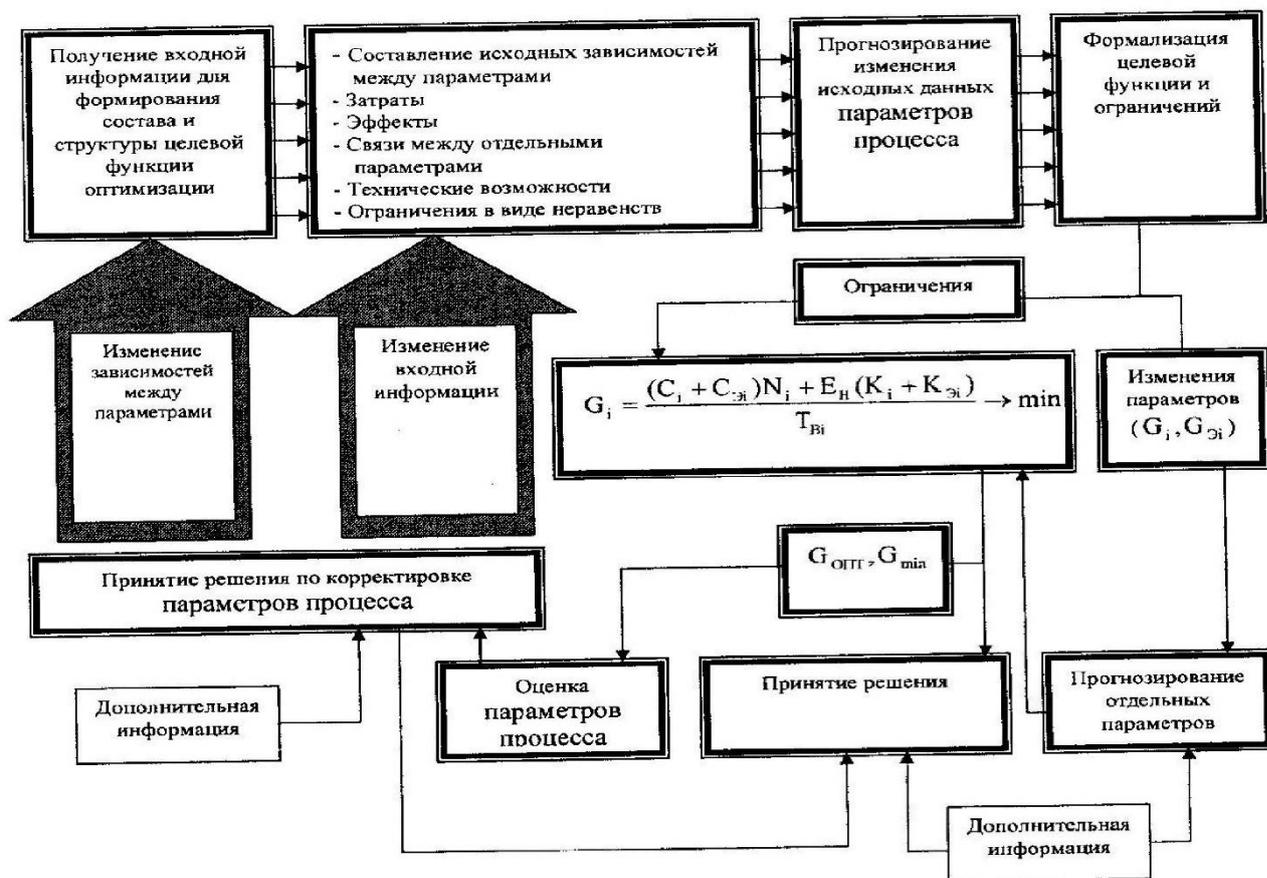


Рисунок 6.9 – Блок-схема алгоритма оптимизации выбора метода формообразования

На рисунке 6.9:

Исходный (первый) блок – блок получения входных данных. В данном блоке формируется целевая функция оптимизации технологического потока гранулирования, её состава и структуры на основе имеющихся исходных данных;

2 – блок исходных зависимостей между параметрами (факторами);

3 – блок прогнозирования изменения исходных данных во времени;

4 – блок составления целевой функции и ограничений по параметрам;

5 – блок решения (вычисления) целевой функции и составляющих оптимальных параметров с учётом ограничений;

6 – блок оценки математической модели оптимизации способа гранулирования, в частности – оценки применимости и необходимости коррекции исходной информации, способов учёта связей между параметрами и их изменений во времени, связей с ценообразованием и т. д.;

7 – блок прогнозирования отдельных параметров для упрощения математической модели выбора способа формообразования;

8 – блок принятия решения по корректировке математической модели оптимизации способа формообразования;

9 – блок принятия решения по параметрам целевой функции оптимизации.

Обобщенными требованиями к разрабатываемой математической модели процедуры оптимизации выбора способа гранулирования являются:

- доступность информации об объекте исследования;
- возможность формализации исходной информации;
- сопоставимость величины погрешности оптимизационной модели с погрешностью обусловленной волатильностью исходных данных и значений вычисленных по модели;

- величина отклонения вычисленных и расчетных значений параметров оптимизируемого процесса должна быть положена в основу расчета погрешности модели;

- унификация и приведение к единой системе переменных рассматриваемого технологического процесса имеющих аналогичные параметры и реализованные в

математических моделях полученных в ходе решения смежных задач, таких как: управление качеством как полуфабрикатов, так и готовой продукции, разработка систем технического обслуживания используемого оборудования, разработка систем управления вспомогательными процессами и др.;

- совместная оценка результатов решения поставленных задач оптимизации производственного процесса в зависимости от значений входных переменных;

- учет возможного изменения во времени: исходных данных, значимости и величины связей, как отдельных параметров, так и их взаимодействий определяющих форму и значения целевой функции оптимизации.

Ключевой задачей при разработке математических моделей является формализация неопределенностей. Решение этой задачи может осуществляться одним из трех способов:

- 1 – составление игровых моделей на основе принятой гипотезы о дальнейшей стратегии развития объекта;

- 2 – использование адаптированных моделей рассматриваемого технологического процесса с последующим обязательным уточнением коэффициентов параметров процесса и его структурных характеристик;

- 3 – применение отдельных методик «теории принятия решения», в частности метод экспертных оценок.

Авторами работ [353, 356] используются технико-экономические показатели оценки существующих и наиболее перспективных методов формования и в частности гранулообразования вязкопластичных и сыпучих сред. Используя метод 3 ими принимаются во внимание следующие обстоятельства, а именно:

- в настоящее время выделено множество разнородных показателей для оценки качества разрабатываемого процесса, в тоже время имеющиеся методики объективного контроля этих показателей еще не имеют формализованного и стандартизованного описания;

- в доступной литературе не найдены значения весовых коэффициентов входящих в разработанные модели и их значимость.

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 6.4);

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 6.4.

Для оценки степени влияния и значимости факторов рассматриваемых способов формообразования может быть использован коэффициент влияния $K_{вл}$, значение которого для рассматриваемого случая (таблица 6.4) будет равно $K_{вл} = 2 + 1 + 2 - 2 - 1 - 1 - 2 = +5 - 6 = -1$.

Здесь коэффициент влияния $K_{вл}$ определялся без учёта значений показателей $\alpha_{i,п}$ и $\beta_{j,о}$. В расчетной практике следует учитывать, что коэффициент $K_{вл}$ целесообразно использовать только в случае формирования обобщенной оценки величины влияния исследуемых факторов. В частности, при исследовании процессов формообразования он учитывает только разность между

отрицательными и положительными связями характерными для анализируемого способа гранулирования.

Таблица 6.4 – Оценка степени влияния показателей способов гранулирования пищекокцентратов на характеристики гранул

Способ гранулирования		Взаимосвязи	Способ гранулирования (например): окачиванием	
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
1.3	Внутренний коэффициент трения		2.3	Получение заданных физико-химических свойств
1.4	Восстановление (растворение)		2.4	Слабые стороны: Необходимость предварительного смачивания
			2.5	Повышенные требования к дисперсности
			2.6	Значительные потери (расход) материала
			2.7	Необходимость введения влагопроводных компонентов

$K_{вл} = -1$ может быть получен при различном сочетании числа положительных и отрицательных связей (+10-11=-1; +2-3=-1 и т. п.). К тому же одна связь не эквивалентна другой по степени влияния на характеристики гранул. Поэтому, ранжирование сильных и слабых связей по степени значимости становится важным пунктом рассматриваемой методики

4 – ранжирование сильных и слабых сторон того или иного способа по степени их значимости. Он заключается в расчёте коэффициентов значимости каждого из способов ($\alpha_{i,п}$ и $\beta_{j,о}$) по формулам:

$$\alpha_{i,\Pi} = \frac{m\Phi_i}{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n m_{i,j}}; \quad (6.21)$$

$$\beta_{j,o} = \frac{m\Phi_j}{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n m_{ij}}; \quad (6.22)$$

В рассматриваемом примере коэффициент значимости фактора $\Phi_{2,1}$ будет равен:

$$\alpha_{2,1} = \frac{2}{2+1+2+2+1+1+2} = \frac{2}{11} = 0,18.$$

Аналогично:

$$\alpha_{2,2} = \frac{1}{11} = 0,09; \quad \alpha_{2,3} = \frac{2}{11} = 0,18; \quad \alpha_{2,4} = \frac{2}{11} = 0,18; \quad \alpha_{2,5} = \frac{1}{11} = 0,09; \quad \alpha_{2,6} = \frac{1}{11} = 0,09; \quad \alpha_{2,7} = \frac{2}{11} = 0,18.$$

5– определение ранга значимости R_C каждого способа гранулирования с учётом рассчитанных на предыдущем этапе показателей α_i и β_i

Кроме этого, необходимо учитывать также важность характеристик сформованных гранул. Для этого может быть рекомендован метод относительных предпочтений, изложенный в работе [3].

Показатели характеристик гранул располагаются в порядке их убывания по степени важности: на первое место – наиболее важный показатель, на последнее – наименее важный. Иначе говоря, строится ряд предпочтений, в котором между равноценными показателями Π_i , Π_j ставится знак равенства ($\Pi_i = \Pi_j$); если Π_i важнее Π_j , между ними ставится знак предпочтения ($\Pi_i > \Pi_j$); в противном случае $\Pi_i < \Pi_j$. Производится попарное сравнение всех показателей гранулирования, при этом каждой паре присваивается показатель предпочтения r_{ij} . При $\Pi_i > \Pi_j$ $r_{ij} = 2$; при $\Pi_i = \Pi_j$ $r_{ij} = 1$; при $\Pi_i < \Pi_j$ $r_{ij} = 0$. Далее строится матрица попарного сравнения.

Для иллюстрации работы приведенной методики приведем пример расчета оценки важности характеристик. Пусть характеристики (таблица 6.4) имеют следующие приоритеты: насыпная плотность (И) больше прочности (В), больше растворимости (восстанавливаемость) (С) = срок хранения (Р).

Данное выражение, являющееся отношением порядка показателей, даёт возможность рассчитать коэффициенты значимости γ (таблица 6.5).

Таблица 6.5 – Расчёт коэффициентов значимости характеристик гранул

Показатель	Насыпная плотность (И)	Прочность (В)	Растворимость (С)	Ресурс (Р)	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}$	γ
Насыпная плотность (И)	----	2	2	2	6	0,5
Прочность (В)	0	----	2	2	4	0,33
Растворимость (С)	0	0	----	1	1	0,085
Срок хранения (Р)	0	0	1	----	1	0,085

Сумма показателей предпочтения для всех строк и столбцов:

$$\sum \gamma_{ij} = 6 + 4 + 1 + 1 = 12.$$

Расчет значимости показателей γ :

$$\gamma_{1,1} = 4/12 = 0,33 ; \gamma_{1,2} = 6/12 = 0,5 ; \gamma_{1,3} = 1/12 = 0,085 ; \gamma_{1,4} = 1/12 = 0,085 .$$

Весомость (ранг) способа гранулирования R_c , зная характеристики гранул, можно определить из следующей зависимости:

$$R_c = \sum_{i=1}^n \alpha_i \gamma - \sum_{j=1}^k \beta_j \gamma , \quad (6.23)$$

Так, например, для осуществления процесса получения гранул способом экструдирования R_c может быть рассчитан следующим образом:

$$R_c = 0,18(0,085 + 0,085) + 0,09(0,085) + 0,18(0,5 + 0,33) - 0,18(0,5 + 0,33) - 0,09(0,33) - 0,09(0,33) - 0,18(0,085 + 0,085) = -0,052.$$

Рассчитанные показатели коэффициента влияния ($K_{вл}$) и весомости способа гранулирования (R_c) для наиболее часто применяющихся методов (способов) гранулообразования (в данном случае – в пяти) показаны в таблице 6.6; аналогично определяется ранг (значимость) и коэффициент влияния для этих же способов (рисунок 6.10).

Таблица 6.6 – Расчётные показатели $K_{в.т}$ и R_c

Способ восстановления	Показатели	
	$K_{в.т}$	R_c
Гранулирование окатыванием	-1	-0,052
Гранулирование экструдированием	2	0,4
Таблетирование	0	0,03
Виброгрануляция	-1	-0,05
Пилетообразование	1	-0,01

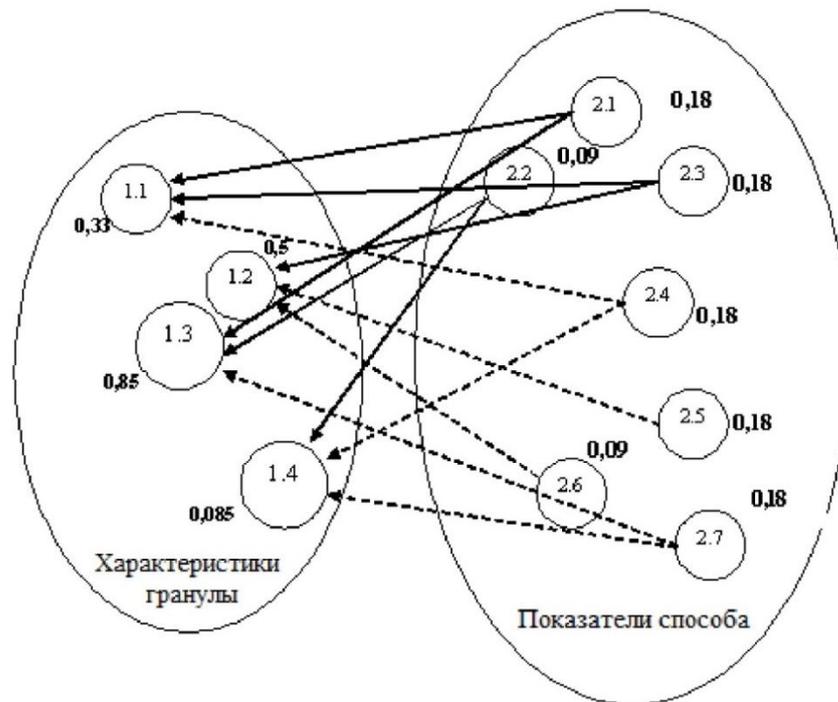


Рисунок 6.10 - Влияние показателей способов на характеристики сформованных гранул (брикетов, таблеток).

Как показывает таблица 6.6, окатывание является оптимальным способом гранулирования (из рассматриваемых).

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.

Глава 7. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ЗАВТРАКОВ НА ОСНОВЕ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ

Исследования, проведенные в предыдущих главах, позволили выработать общую концепцию создания быстрорастворимых гранулированных пищевых концентратов на основе молочной сыворотки. В данной главе рассмотрим особенности технологии производства быстрорастворимых гранулированных завтраков на основе молочной сыворотки.

7.1 Быстрорастворимый гранулированный завтрак на основе молочной сыворотки и экстракта аронии черноплодной

7.1.1 Научное обоснование рецептуры

Для обоснования рецептурного состава проведены исследования химического состава черноплодной аронии для оценки ее пищевой ценности и возможности использования в технологии гранулированных пищевых концентратов (киселей). Известно, что химический состав плодов аронии может значительно варьировать, исходя из условий выращивания, почвенных, климатических факторов и климата [222,305]. Исходя из этого, поставлена задача – дать характеристику пищевой ценности исследуемой культуры, культивируемой на территории Кемеровской области.

Свежие плоды черноплодной аронии исследовали в сентябре – октябре, с целью получения продуктов ее ферментативного гидролиза применяли комплекс пектолитических, цитолитических, протеолитических и амилолитических ферментов. В условиях такой обработки большинство веществ, в том числе высокомолекулярные, нерастворимые соединения белковой и углеводной природы, связанные со структурными компонентами клеток, приобретают растворимые свойства.

Интенсификация процесса ферментации проводилась путем определения оптимальных технологических параметров производства – продолжительности ферментативного гидролиза, условий *pH*-среды, состава ферментативного комплекса, температурного режима.

Рассматриваемые параметры, используемые для обеспечения ферментативного гидролиза, обосновывали с учетом особенности действия применяемых ферментов. Процесс ферментации осуществлялся при действии фермента на уровне 0,03% от массы исходного продукта при *pH* 4,8–5 и 40–45°C. Продолжительность ферментации – 4 часа, которую определяли исходя из максимального выхода сухих веществ (2 часа).

В таблице 7.1. представлены данные, характеризующие химический состав исследуемого объекта.

Таблица 7.1 – Химический состав плодов аронии черноплодной до и после ферментации

Показатели	Содержание, массовая доля, %	
	до ферментации	после ферментации
Сухие веществ	19,5±0,5	19,5±0,5
Азотистые веществ	1,6±0,1	1,6±0,1
Клетчатка	1,9±0,1	1,0±0,1
Пектиновые вещества	1,10±0,05	0,30±0,05
Дубильные вещества	0,90±0,03	0,40±0,03
Сахара	11,5±0,5	12,5±0,5
Органические кислоты (в пересчете на яблочную)	1,3±0,1	2,5±0,1
Зола	1,2±0,06	1,2±0,06

Полученные результаты показали, что количество сухих веществ в исследуемых плодах находятся на уровне 19,5% . При этом процент дубильных веществ, пектинов, сахаров, минералов некоторых других веществ, относящихся к растворимым, составил 16,8 (в пересчете на сырые вещества). Наибольший процент, 11,5 – это сахара.

Критерием для оценки вкусовых достоинств плодово-ягодных культур является показатель числового отношения процентного содержания сахара к кислоте (сахарокислотный коэффициент) наряду с показателем степени сладости профилирующего сахара. Исследование указанного показателя от начала созревания до потребительской зрелости показало его постоянный рост при достаточно высоком уровне на начальной стадии [234]. Что касается местных сортов черноплодной аронии, то изучаемый сахарокислотный коэффициент находился на уровне 8,1%.

Содержание в плодах клетчатки, пектиновых и дубильных веществ формирует их вкусовые характеристики, при этом дубильные вещества обеспечивают наличие кисло-сладким плодам вяжущего и терпкого вкуса.

Среднее содержание дубильных веществ в аронии – 9%: клетчатки содержится 1,9%, пектинов – 1,1%. Содержание зольных и минеральных веществ в (1,4–2) раза выше (~1,2%), чем у крыжовника, смородины и малины [120].

Данные по изучению содержания клетчатки свидетельствуют о ее двукратном снижении после окончания ферментации плодов, дубильных веществ – в 2,5 раза, пектиновых – в 4 раза. Отмечено повышение сахаров до 12,5 % (8,7 %) и органических кислот – в 2 раза. Такие результаты можно объяснить особенностью действия ферментов пектолитического ряда, обладающих способностью расщеплять клетчатку до органических кислот и сахаров, а также красящие, дубильные и пектиновые соединения. При этом количество зольных и азотистых веществ не претерпело каких-либо изменений и находилось соответственно на уровне 1,2 и 1,6 %.

Проведены исследования химического состава плодов аронии черноплодной (минеральной и витаминной ценности).

В таблице 7.2. представлены данные по содержанию минеральных элементов в исследуемом растительном объекте до и после гидролитического ферментативного воздействия.

Таблица 7.2 – Минеральный состав плодов рябины черноплодной до ферментативного гидролиза и после

Показатели	Содержание, мг%	
	до ферментации	после ферментации
Кальций	70,50±0,40	70,00±0,40
Фосфор	13,00±0,08	13,00±0,08
Калий	60,00±0,08	58,00±0,08
Натрий	6,10±0,20	5,90±0,20
Магний	0,10±0,05	0,10±0,05
Железо	2,80±0,04	2,50±0,04
Цинк	0,28±0,01	0,20±0,01
Молибден	0,018±0,001	0,018±0,001
Медь	0,20±0,02	0,15±0,02

Показано, что в наибольшем количестве из определяемых зольных элементов содержится кальций в количестве 69,9 мг/100 г. Второй по величине определения – калий – 59,9 мг/100 г.

Биохимическое значение калия заключается в обеспечении активности ферментов, участвующих в ключевых метаболических процессах организма. Дефицит этого элемента приводит, главным образом, к нарушению обменных реакций сердечной мышцы и служит фактором риска для развития соответствующих патологий.

Количество фосфора составляет 12,9 мг/100 г. Другой основной элемент – натрий в аронии содержится в количестве 5,9 мг/100 г. Известна роль железа в процессах кроветворения, что определяет его роль в жизнедеятельности организма. Его содержание находится в среднем на уровне 2,9 мг/100 г. Что касается остальных пищевых веществ этой группы, то они содержатся в сравнительно меньшем количестве, мг/100 г: медь – 0,19, магний – 0,11; цинк – 0,27; молибден – 0,017.

Содержание таких микроэлементов, как молибден, фосфор и магний находилось на прежнем уровне, что касается других, то отмечено их уменьшение в среднем на 3 %

В таблице 7.3 представлены данные по содержанию витаминов в аронии после ферментативного гидролиза по сравнению с показателями до ферментации

Таблица 7.3 – Содержание витаминов в плодах аронии до и после ферментации

Показатели	Содержание, мг%	
	до ферментации	после ферментации
Витамины:		
аскорбиновая кислота (С)	29,8±0,5	20,5±0,5
тиамин (В ₁)	0,04±0,001	0,04±0,001
рибофлавин (В ₂)	0,02±0,001	0,02±0,001
фолацин (В ₉)	0,06±0,001	0,04±0,001
токоферол (Е)	1,40±0,05	1,40±0,05
ниацин (РР)	0,70±0,01	0,70±0,01
филлохинон (К ₁)	0,70±0,02	0,70±0,02
Витаминоподобные соединения:		
β-каротин	1,90±0,01	1,90±0,01
биофлавоноиды	2900±50	2800±50

Наличие в плодах витаминов наряду со значительным содержанием органических кислот и сахаров дает возможность относить рябину черноплодную к категории лекарственного сырья [17]. Её плоды могут быть значительным источником антиоксидантов – биофлавоноидов, содержание которых находится на уровне 2850 мг/100 г. Помимо антиоксидантной активности они снижают проницаемость стены капилляров, увеличивая, тем самым, прочность их стенок

Содержание витамина С составляет, в среднем, 30,0 мг/100 г. Вместе с тем, включение в рацион ягод аронии в количестве 200 г, способно удовлетворить суточную потребность в витамине Р.

Что касается других витаминов, то зарегистрирован их незначительный уровень, который составляет, мг/100 г: β-каротин – 1,88; тиамин – 0,03; фоллихинон – 0,68; рибофлавин – 0,03; ниацин – 0,69; фолацин – 0,07; токоферол – 1,39.

Проведенные исследования показали, что в результате ферментативного гидролиза содержание витаминов в плодах черноплодной рябины практически не изменяется. Отмечено незначительное падение уровня аскорбиновой кислоты до

9,2 мг/100 г. Такой результат объясняется термостабильными свойствами витамина С и температурными режимами гидролиза на уровне 42,5°C, а также непродолжительным его периодом – 2 часа.

Таким образом, применение в качестве сырья плодов аронии позволяет производить гранулированные кисели с относительно высокой минеральной и витаминной ценностью. Определённый вклад в пищевую ценность быстрорастворимого напитка вносят пектиновые и дубильные соединения, углеводы, органические кислоты и неусвояемые углеводы (клетчатка).

В качестве объекта исследования применялась молочная сыворотка; ее состав, характеризующий качество, представлен в таблице 7.4 [272].

Таблица 7.4 – Основные качественные показатели нативной молочной сыворотки

Показатели	Значения
Содержание сухих веществ, %	6,0±0,5
в том числе:	
лактозы	4,6±0,3
белка	1,0±0,2
минеральных веществ	0,6±0,2
молочного жира	0,3±0,1
Кислотность, °Т	64,0±10,0
Плотность, г/см ³	1,022±0,001

Создание рецептуры разрабатываемого напитка (в области его проектирования) с использованием подсырной сыворотки пересекается с её физико-химическими показателями.

Качественные характеристики сухой молочной сыворотки показаны в таблице 7.5 [189,179].

Необходимо отметить, что для обогащения быстрорастворимого завтрака витаминным премиксом практический интерес представляют данные о содержании витаминов в сухой молочной сыворотке [274].

Таблица 7.5 – Органолептические и физико–химические показатели сухой порошкообразной молочной сыворотки

Наименование показателя	Характеристика показателей
Внешний вид и консистенция	Мелкий, сухой порошок, допускается незначительное количество комочков, легко рассыпающихся при механическом воздействии. Размер частичек продукта от 0 до 100 мкм
Вкус и запах	Вкус продукта – молочный, сладко–солончатый, без наличия посторонних привкусов. Запах – слабо выраженный сывороточный
Цвет	Белый, слегка желтоватый
Массовая доля сухих веществ, %	96±1,0
Массовая доля лактозы, %	69±1,0
Кислотность сыворотки, восстановленной до массовой доли сухих веществ 6,0	12,5°Т
Растворимость, см ³ , сырого остатка, не более	0,3

В таблице 7.6 представлена витаминная ценность сыворотки (сухой творожной), которая характеризуется достаточно высоким содержанием рассматриваемых нутриентов.

Эти данные свидетельствуют о необходимости их учета при обогащении завтрака витаминным премиксом. В частности, необходимо учитывать количество витаминов в используемом экстракте черноплодной рябины и сгущенной сыворотке

Для концентрирования экстракта его помещали в роторно-пленочный вакуум-испаритель. Процесс осуществляется при температуре 49±1°С совместно с сывороткой (творожной) в соотношении 3:1. По окончании концентрирования количество сухих веществ составляет 57,5±2,5 мас.%. Установленные режимы обеспечивают снижение пенообразования и кислотности, повышают скорость упаривания. Основное значение в этих процессах отводится пектиновым веществам экстракта.

Таблица 7.6 – Витаминный состав сухой молочной сыворотки

Витамины	Содержание, мг/100 г
Тиамин (В ₁)	0,466±0,012
Рибофлавин (В ₂)	1,858±0,050
Пиридоксин (В ₆)	0,643±0,015
Кобаламин (В ₁₂)	0,009±0,0003
Пантотеновая кислота (В ₃)	3,445±0,110
Биотин (Н)	0,055±0,002
Никотиновая кислота (РР)	2,061±0,070
Фолиевая кислота (В ₉)	0,291±0,010
п-Аминобензойная кислота	0,001±0,0005
Холин	236,3±6,5
Аскорбиновая кислота (С)	0,62±0,020
Ретинол (А)	0,127±0,0045
Токоферолы (Е)	0,11±0,0035
Кальциферолы (D)	0,451±0,015
Филлохинон (К)	0,144±0,045

Показатели качества испытуемой смеси экстракта сыворотки представлены в таблице 7.7. Как видно из таблицы 7.7, смесь характеризуется относительно высокой концентрацией пектиновых соединений, аскорбиновой кислоты, биофлавоноидов, тиамина, пиридоксина и рибофлавина. Эти данные свидетельствуют о целесообразности использования смеси в рецептуре завтрака.

7.1.2 Рецептурный состав

Рецептурный состав был научно обоснован, исходя из характеристики ингредиентного состава растительных компонентов, формирующих функциональные свойства специализированного продукта. В качестве основного сырья для производства завтрака применяли экстракт из черноплодной рябины, 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.

Таблица 7.7 – Качественные характеристики смеси молочной сыворотки и экстракта аронии черноплодной

Показатель, массовая доля	Содержание
Растворимых сухих веществ, %	60±2,9
Титруемых кислот (в пересчете на яблочную кислоту), %	5,3±0,9
Сахаров, г/100 г	46,7±5,7
Пектиновых веществ, г/100 г	5,9±1,1
Золы, г/100 г	3,2±0,5
Натрия, мг/100 г	4,20±0,20
Калия, мг/100 г	34,10±0,08
Кальция, мг/100 г	48,70±0,40
Магния, мг/100 г	0,08±0,005
Фосфора, мг/100 г	5,90±0,08
Железа, мг/100 г	2,10±0,04
Тиамин (В ₁), мг/100 г	0,25±0,005
Рибофлавин (В ₂), мг/100 г	0,96±0,005
Пиридоксин (В ₆), мг/100 г	0,29±0,015
Ниацин (РР), мг/100 г	1,59±0,05
Витамина С, мг/100 г	153±3,5
Ретинола (А), мг/100 г	0,086±0,005
Холина, мг/100 г	139,5±6,5
Биофлавоноидов (по рутину), мг/100 г	2400±50

Проведена оценка сенсорных показателей рецептурных вариантов, позволившие разработать сухой завтрак с заданными потребительскими свойствами (таблица 7.8).

Качество сухих завтраков изучали в соответствии с разработанной 20-балльной эталонной шкалой. Аналогично изучали органолептику разработанного продукта, который получали при разведении в горячей питьевой воде гранулированной массы.

Таблица 7.8 – Варианты рецептур быстрорастворимых сухих завтраков на основе молочной сыворотки и экстракта аронии черноплодной

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		

В качестве критериев при оценке органолептических показателей использовали балловую систему, характеризующую консистенцию и внешний вид, вкус и запах, и цвет, соответственно 7, 10, 3. При этом аромат и вкус получили наибольшее количество баллов.

Разработанный пищекоцентрат (сухой завтрак) отличался наличием овсяной муки в качестве структурообразователя, что придавало ему вязкую консистенцию. Наличие в продукте нерастворившейся овсяной муки в форме комочков является признаком нарушения консистенции и снижает потребительские свойства разработанного продукта. При этом цвет оценивается 3 баллами, консистенция и внешний вид – 7 баллов.

В таблице 7.9 представлены сравнительные показатели испытываемых вариантов завтраков.

Материалы таблицы свидетельствуют о соответствии качества сухих завтраков количеству баллов, что и отражается на их итоговой комплексной характеристике.

Органолептическая оценка 1-го варианта завтраков показала, что они характеризуются показателями, которые не свойственны разработанному продукту (жидкая консистенция, слишком сладкий вкус). Оценка дегустационной

комиссии – 18,1 балла. Принимая во внимание оцениваемые факторы, о которых говорилось выше, общая оценка качества сухого завтрака – «хорошо».

Таблица 7.9 – 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)

Достоинства завтрака № 2: внешний вид – привлекателен; гармоничный, присущий именно черноплодной рябине вкус (~10 баллов); приятный цвет (4 балла); консистенция – близка к оптимальной. Суммарная оценка варианта № 2 достаточно высока – 19,8 балла.

При изучении заданных показателей 3-го варианта завтрака отмечен недостаточный уровень аромата черноплодной рябины и вкуса, что объясняется незначительным количеством используемого экстракта. Наблюдалась густая консистенция, которая обусловлена большим содержанием овсяной муки. Все это послужило основанием отметить этот вариант завтрака по уровню качества как «хороший» – 17,6 балла

На основании проведенных органолептических исследований сделано заключение о наилучших показателях завтрака № 2. В таблице 7.10 приведена рецептура сухого гранулированного завтрака, основой которого стала рецептура № 2.

В состав завтрака входят натуральные ингредиенты, характеризующиеся функциональной активностью и общеукрепляющими свойствами. Овсяная мука, входящая в состав завтрака, обладает способностью снижать уровень холестерина и обеспечивать процессы пищеварения. Отмечены также сосудорасширяющие свойства, обусловленные наличием экстракта плодов черноплодной рябины, оказывающие положительное влияние при гипертонии.

Таблица 7.10 – Рецептура быстрорастворимого гранулированного сухого завтрака на основе молочной сыворотки и экстракта аронии черноплодной, кг /100кг

Наименование сырья	Содержание сырья в готовом завтраке
Мука овсяная	50,0
Экстракт аронии черноплодной (с.в. 60 %)	10,0
Сахарная пудра	24,0
Сухая подсырная сыворотка	8,0
Молочная сыворотка (с.в. 60 %)	3,1
Шрот аронии черноплодной	4,7
Премикс «Валетек–3»	0,2
Итого	100

Витаминный премикс, включенный в состав завтрака, наряду с другими компонентами, равномерно распределен по всей массе продукта и хорошо усваивается организмом. Входящие в рецептуру витамины аналогичны натуральным по своим фармакологическим, биохимическим свойствам и эффективности.

Завтрак готовится путем растворения в воде при $90\pm 10^{\circ}\text{C}$; время приготовления составляет, в среднем, 40 секунд. Для готового завтрака характерен запах черноплодной рябины, цвет светло-розовый, вкус – кисловато-сладкий, гармоничный.

Предложенный вариант завтрака, исходя из своего рецептурного состава, обладает свойствами, повышающими сопротивляемость организма к воздействию неблагоприятных факторов внутренней и окружающей среды. Это обусловлено наличием биологически активных веществ с направленным функциональным действием, в частности, обладающих иммуномодулирующими и протекторными свойствами

Использование премикса гарантирует необходимый уровень содержания витаминов и минералов в количествах, характеризующих профилактические

свойства и необходимый уровень суточной потребности (25%) при условии потребления одной порции [158–165].

7.1.3 Технология производства

Рецептурная формула завтрака гранулированного быстрорастворимого включает следующие компоненты: премикс для обогащения пищевых концентратов «Валетек-3»; овсяную муку; сахар (в виде пудры); сыворотку подсырную сухую; экстракт черноплодной рябины; сыворотку творожную.

Схема технологического процесса производства быстрорастворимого завтрака с использованием экстракта черноплодной рябины и творожной сыворотки приведена на рисунке 7.1.

Исходное плодово-ягодное сырьё, очищенное от примесей (травы, листьев и земли, грязи и др.) тщательно моется, что значительно снижает микробиологическую обсемененность. Далее производится проверка сырья с удалением незрелых, мятых и гнилых плодов

Подготовленное после инспекции сырьё направляют на сушку при температурном режиме $52 \pm 2,5^\circ\text{C}$, которое обеспечивает стабильность термолабильных нутриентов.

Следующий этап технологического процесса включает измельчение сухих плодов до размера $1,0 \pm 0,5$ мм. При использовании воды, как растворителя, это улучшает набухание измельченного сырья, что усиливает контакт между ней (массой) и экстрагентом.

После измельчения следующий этап – экстракция. Температура экстракции – $45 \pm 5^\circ\text{C}$; соотношение экстрагента (вода, этанол или их растворы) к сырью – 1/10–1/7. Экстракция с помощью данных экстрагентов обеспечивает максимальное количество и широкий спектр извлекаемых соединений, позволяют разделять их на отдельные фракции, варьировать спектр. Благодаря последовательному извлечению достигается практически полная экстракция ингредиентов их испытуемого сырья.

группы высокомолекулярных соединений и обладающего одинаковыми структурно-механическими свойствами.

По окончании процесса экстракции подготовленная смесь фильтруется с целью отделения шрота от экстракта. Шрот отправляют на сушку до достижения влажности на уровне 14 %, затем измельчают до частиц размером $0,015 \pm 0,05$ мм.

Творожную сыворотку концентрируют при наличии экстракта в соотношении 1:3. Процесс осуществляется в роторно-пленочном вакуумном испарителе при температуре $49 \pm 1^\circ\text{C}$ до концентрации сухих веществ $57,5 \pm 2,5\%$. Щадящие технологические режимы гарантируют стабильность термолабильных биоактивных веществ, микробиологическую безопасность и химическую стабильность [120].

Следующий этап заключается в смешивании сухой сыворотки и сахара-песка (предварительно измельченного). Соотношение указанных ингредиентов три к одному. После предварительного смешивания сухой сыворотки и сахарной пудры для обеспечения однородности и равномерности распределения по всей массе продукта полученные смеси, жидкие и другие компоненты рецептуры смешиваются в смесителе.

Приготовленную смесь направляют в тарельчатый гранулятор с заданным содержанием жидкой фазы, к которому подключен диспергатор для более интенсивного зародышеобразования, обеспечивающего производительность и однородность гранул. Проводится корректировка содержания жидкой фазы до оптимального уровня за счет напыления концентрированной смесью в процессе гранулирования.

Гранулированный завтрак высушивают воздухом в сушилке при $52,5 \pm 2,5^\circ\text{C}$ до остаточной влажности $8,5 \pm 0,5\%$.

Готовые окатыши (гранулы) направляют на сортировку через вибросито и затем в накопительный бункер. Остатки с верхнего и нижнего сита направляют на измельчение и переработку.

Готовый завтрак, гранулированный быстрорастворимый, передают на этапы фасовки, упаковки и хранения.

7.1.4 Исследование потребительских свойств. Определение регламентируемых показателей качества, сроков и режимов хранения

Известно, что для каждого пищевого продукта характерны присущие только ему потребительские свойства, которые зависят от ингредиентов, входящих в рецептуру и регулируемых технологических параметров производства. При создании нового продукта устанавливаются регламентируемые показатели качества: органолептические и пищевая ценность, определяющая его функциональные свойства.

Органолептические критерии качества разрабатываемого завтрака даны в таблице 7.11.

Таблица 7.11 – Органолептические показатели быстрорастворимого гранулированного завтрака на основе молочной сыворотки и экстракта аронии черноплодной

Наименование показателя	Характеристика	
	Концентрат	Готового завтрака
Внешний вид	Компактные, плотные, округлой формы с матовой поверхностью, однородные равномерно окрашенные гранулы	Свойственный завтраку, приготовленному по способу указанному на этикетке
Цвет	Свойственный используемому виду плодово-ягодного сырья, от более насыщенного в концентрате до менее насыщенного в готовом завтраке, допускается более светлый тон	
Вкус и запах	Свойственные аронии черноплодной и сыворотке, посторонние запахи и привкусы не допускаются	
Консистенция	Однородные гранулы размером от 0,5 до 2,0 мм	Вязкая однородная масса с включениями плодовой мякоти

Сенсорные показатели гранулированного завтрака соответствуют по своему уровню известным аналогам.

Энергетическая и пищевая ценность позиционируются как приоритетные критерии качества пищевой продукции. Пищевая ценность включает совокупность полезных свойств, направленных на обеспечение потребности

организма в незаменимых нутриентах и энергии, а также углеводах, белках и жирах. Под энергетической ценностью понимают количество энергии в ккал или кДж, которое образуется в организме в процессе метаболизма пищевых веществ и также направлено на биохимические реакции синтеза и различные физиологические нужды.

Не менее приоритетными показателями являются химический состав и физико-химические критерии качества разрабатываемого завтрака. Результаты исследования представлены в таблице 7.12.

Таблица 7.12 – Физико–химические показатели качества быстрорастворимого гранулированного завтрака

Наименование показателя	Значение показателя
Массовая доля сухих веществ, %, не менее	91,5
В том числе:	
углеводов	87,0±0,3
белка	4,8±0,3
жира	3,0±0,02
зола	1,6±0,4
Массовая доля влаги, %, не более	8,5
Массовая доля титруемых кислот (в пересчете на лимонную кислоту), %, не более	1,2
Массовая доля пектиновых веществ, %	0,61
Растворимость, сек, не более	40,0
Массовая доля металлических примесей (размер отдельных частиц не должен превышать 0,3 мм в наибольшем линейном измерении), %, не более	$3 \cdot 10^{-4}$
Массовая доля посторонних минеральных примесей, %, не более	$1 \cdot 10^{-2}$
Посторонние примеси (кроме металлических и минеральных), а также зараженность вредителями	Отсутствуют
Гранулометрический состав:	
– остаток на сите 0,5 мм, %, не более	98,0
– остаток на сите 2,0 мм, %, не более	0,5

Из данных таблицы следует, что изучаемые показатели не претерпевают каких-либо изменений исходя из имеющихся норм в отношении испытуемой группы продуктов.

Исследование химического состава позволило определить энергетическую ценность быстрорастворимого завтрака, которая составляет 394 ккал/100 гранулированной формы или 98,5 ккал/200 мл восстановленного продукта.

Следует отметить, что в основе научного понимания пищевой и биологической ценности продуктов питания лежат концепции адекватного и сбалансированного питания академиков А. М. Уголева и А. А. Покровского, которые получают свое развитие в трудах академика В. А. Тутельяна и его учеников [222, 226].

В основе организации здорового питания лежит научно обоснованное обеспечение населения специализированными продуктами с необходимым уровнем потребления эссенциальных и жизненно важных нутриентов, в том числе многочисленных минорных ингредиентов пищи. Дефицит жизненно важных нутриентов в рационе оказывает неблагоприятное влияние на умственную и физическую работоспособность, сопротивляемость к неблагоприятным воздействиям окружающей и внутренней среды, экологии, ухудшает лечение патологических состояний и их профилактику и, в целом, отрицательно сказывается на здоровье, экономическом и социальном благополучии современного человека. Дополнительное включение в рецептуру незаменимых пищевых веществ должно составлять не менее 30% от их потребности при употреблении установленного нормативного количества пищевого продукта. В данном случае это количество составляет 200 г завтрака. В таблице 7.13 представлено количественное содержание витаминов в разработанном завтраке.

Установлено, что используемый премикс обеспечивает специализированному продукту функциональную направленность.

Разработанный быстрорастворимый гранулированный завтрак не является достаточным источником минеральных веществ.

Известно, что изучение показателей безопасности, наряду с характеристикой пищевых свойств, является оценкой критериев безопасности разрабатываемого продукта (санитарно-гигиенические и санитарно-токсикологические).

Таблица 7.13 – Содержание витаминов и минералов в 200 мл (25 г) восстановленного быстрорастворимого завтрака на основе молочной сыворотки и экстракта аронии черноплодной

Витамины	Содержание, мг	Адекватный (верхний допустимый) уровень потребления, мг в сут.
Витамин А	0,15	1,0 (3,0)
Витамин Д	0,0014	0,005 (0,015)
Витамин Е	1,25	15,0 (100,0)
Витамин В ₁	0,24	1,7 (5,1)
Витамин В ₂	0,38	2,0 (6,0)
Витамин В ₆	0,33	2,0 (6,0)
Витамин РР	2,77	20,0 (60,0)
Пантотеновая кислота	1,1	5,0 (15,0)
Витамин В ₁₂	0,0006	0,003 (0,009)
Фолиевая кислота (В ₉)	0,068	0,4 (0,6)
Биотин	0,029	0,05 (0,15)
Витамин С	20,82	70,0 (700,0)
Холин	15,8	500 (1000)
Биофлавоноиды	63,4	85,0 (120,0)
Натрий	1,98	–
Калий	26,48	2500,0 (3500,0)
Кальций	11,22	1250,0 (2500,0)
Магний	6,25	400,0 (800,0)
Фосфор	43,02	800,0 (1600,0)
Железо	0,28	15,0 (45,0)
Марганец	0,10	2,0 (11,0)
Медь	0,05	1,0 (5,0)
Цинк	0,14	12,0 (40,0)

Имеющиеся литературные сведения не являются, в большинстве случаев, свидетельством о развитии микробиологической порчи рассматриваемой продукции. Вместе с тем имеются данные об увеличении общего количества микрофлоры продуктов молочных сухих в процессе хранения, в том числе отмечено увеличение содержания бактерий, относящихся к группе кишечной палочки [35].

С учетом вышеизложенного проведены микробиологические исследования гранулированного завтрака после окончания технологического процесса его производства. В качестве сравнения использовались нормативные, относящиеся к испытываемой группе молочных продуктов (таблица 7.14).

Таблица 7.14 – Микробиологические показатели свежесыроизготовленного быстрорастворимого завтрака на основе молочной сыворотки и экстракта аронии черноплодной

Наименование показателя	Норма	Результаты исследований
КМАФАнМ, КОЕ/г, не более	$5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^2$
БГКП (колиформы), в 1 г продукта	Не допускается	Не обнаружено
<i>S.Aureus</i> , в 1 г продукта	Не допускается	Не обнаружено
Патогенные, в т.ч. сальмонелла, в 25 г продукта	Не допускается	Не обнаружено

Для современного этапа развития человеческого общества характерен период интенсивного техногенного развития. Широко распространены различные экологические и техногенные катастрофы, климатические и другие неблагоприятные факторы. Все это неизбежно приводит к негативным последствиям в организме, срыву адаптационных возможностей с соответствующими последствиями. В этой связи особое внимание уделяется нормируемому уровню токсичных веществ в пищевой продукции. Критерии безопасности завтрака по рассматриваемым показателям приведены в таблице 7.15

Из представленных в таблицах 7.14 и 7.15 материалов видно, что разработанный продукт по микробиологическим критериям и количеству тяжелых металлов соответствует нормам и является безопасным при употреблении в пищу.

Таблица 7.15 – Содержание токсичных элементов в быстрорастворимом гранулированном завтраке на основе молочной сыворотки и экстракта аронии черноплодной

Наименование показателя	Норма	Результаты исследований
Свинец, мг/кг, не более	0,5	0,08
Мышьяк, мг/кг, не более	0,5	Не обнаружено
Кадмий, мг/кг, не более	0,1	Не обнаружено
Ртуть, мг/кг, не более	0,02	Не обнаружено
Медь, мг/кг	10,0	0,7
Цинк, мг/кг, не более	30,0	1,9
Пестициды:		
– гексахлорциклогексан;	0,1	Не обнаружено
– ДДТ и его метаболиты	0,1	Не обнаружено

Проведенные исследования подтверждают правильность установленных параметров и режимов производства инстантированного гранулированием завтрака на основе творожной сыворотки и экстракта аронии черноплодной, гарантирующих безопасность продукта. При наличии в продукте сверх требуемого количества влаги (что может происходить за счет относительно 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 завтраков обеспечивает регламентируемые сроки хранения с сохранением критериев качества (пищевая ценность, сенсорные показатели), что подтверждается результатами комплексных исследований.

Разработанные завтраки относятся к пищекоцентрам – продуктам длительного хранения. Это требует соблюдения температурно-влажностного

режима, нарушение которого приводят к нежелательным изменениям, порче и, как следствие, нанесению ущерба для здоровья.

С целью определения регламентируемых сроков реализации завтрака проведены комплексные микробиологические, физико-химические и органолептические исследования. В качестве тары для фасовки продукции были использованы пластиковые банки. Данная тара разрешена Роспотребнадзором, для хранения пищевой продукции. Условия хранения продукта в банках: срок – 9 месяцев; температура – $20\pm 2^{\circ}\text{C}$; относительная влажность – $75\pm 5\%$.

Результаты испытываемых показателей гранулированного завтрака при указанных условиях хранения представлены в таблице 7.16

Как видно из данных таблицы 7.16, органолептические критерии качества оставались без видимых изменений на протяжении всего срока хранения и получили оценку «отлично» (19 баллов, не менее), аналогичная картина наблюдалась в отношении физико-химических показателей.

Микробиологические критерии качества завтраков при хранении даны в таблице 7.17.

Полученные материалы свидетельствовали об отсутствии допустимых уровней изменений микробиологических показателей разработанного продукта по окончании срока хранения.

На основании полученных материалов можно отметить относительно высокие качественные характеристики и безопасность разработанного продукта (на основе физико-химических и органолептических показателей).

Определены сроки реализации быстрорастворимого завтрака на основе экстракта черноплодной рябины и творожной сыворотки – 6 месяцев со дня изготовления с необходимым «запасом прочности» 3 месяца.

Таблица 7.16 – Динамика изменений органолептических и физико–химических показателей качества быстрорастворимого гранулированного завтрака при хранении

Наименование показателя	Продолжительность хранения, мес.			
	0	3	6	9
1	2	3	4	5
Запах и вкус, балл	9,78±0,35	9,78±0,35	9,78±0,35	9,78±0,35
Цвет, балл	4,00±0,00	4,00±0,00	3,86±0,35	3,86±0,35
Внешний вид и консистенция, балл	6,00±0,00	6,00±0,00	5,86±0,35	5,86±0,35
Суммарная балльная оценка, балл	19,78±0,35	19,78±0,35	19,50±1,05	19,50±1,05
Массовая доля сахарозы, %, не менее	48,00±0,05	48,00±0,05	47,70±0,05	47,60±0,05
Массовая доля титруемых кислот (в пересчете на лимонную кислоту), %	1,20±0,05	1,20±0,05	1,25±0,05	1,30±0,05
Растворимость, сек	40,00±1,00	40,00±1,00	41,00±1,00	43,00±1,00
Гранулометрический состав:				
– остаток на сите 0,5 мм, %, не более	98,00±1,05	98,00±1,05	98,00±1,05	98,00±1,05
– остаток на сите 2,0 мм, %, не более	0,50±0,01	0,50±0,01	0,50±0,01	0,50±0,01
Массовая доля влаги, %	8,50±0,03	8,50±0,03	8,70±0,03	8,95±0,03

Таблица 7.17 – Микробиологическая обсемененность быстрорастворимого завтрака на основе молочной сыворотки и экстракта аронии черноплодной при хранении

Показатель	Норма	Срок хранения, месяцы			
		0	3	6	9
КМАФАнМ, КОЕ/г, не более	$5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$
БГКП (колиформы), в 1 г продукта	Не допускается	Не обнаружено			
S.Aureus, в 1 г продукта	Не допускается	Не обнаружено			
Патогенные, в т.ч. сальмонелла, в 25 г продукта	Не допускается	Не обнаружено			

7.2 Быстрорастворимый гранулированный завтрак на основе молочной сыворотки и рябины обыкновенной

7.2.1 Научное обоснование рецептуры

Химический состав растительного сырья, характеризующий пищевую ценность, может варьироваться в значительных пределах исходя из климатических условий, района произрастания, технологических особенностей производства и переработки, режимов хранения. Это послужило основанием для изучения качественных характеристик местных сырьевых плодово-ягодных ресурсов.

В качестве объекта исследования изучалась рябина обыкновенная – *Sorbus aucuparia* L. после сбора урожая (смесь плодов), культивируемая на территории Кемеровской области.

Результаты химического состава используемого сырья даны в таблице 7.18.

Как видно из данной таблицы, плоды рябины содержат относительно большое количество биофлавоноидов, аскорбиновой кислоты, β -каротина, в несколько меньших количествах – минеральные соединения, то есть данное сырье характеризуется наличием широкого спектра биологически активных соединений, обеспечивающих пищевую ценность и функциональные свойства разрабатываемого продукта. Это отвечает современным направлениям развития агропромышленного комплекса в области рационального использования сырьевых ресурсов и производства продуктов здорового питания.

В работе использовался жмых, который остается при производстве сока и также содержит значительное количество полезных веществ. Поэтому проведены исследования качественных показателей жмыха, наряду с соком, получаемым из плодов рябины

Таблица 7.18 – Химический состав плодов рябины обыкновенной

Показатели, массовая доля	Содержание
Растворимых сухих веществ, %	19,1±1,7
Органических кислот (в пересчете на яблочную кислоту), %	2,0±1,0
Углеводов, г/100 г	12,1±1,6
Белка, г/100 г	0,3±0,2
Пектиновых веществ, г/100 г	1,2±1,2
Дубильных веществ, г/100 г	0,7±0,2
Золы, г/100 г	0,5±0,3
Клетчатки, г/100 г	2,3±0,4
Натрия, мг/100 г	8,2±3,0
Калия, мг/100 г	346,4±12,1
Кальция, мг/100 г	56,1±3,2
Магния, мг/100 г	41,2±2,4
Фосфора, мг/100 г	36,2±3,5
Железа, мг/100 г	24,9±0,8
Витамина С, мг/100 г	134,0±17,2
β-каротина, мг/100 г	14,7±3,8
Биофлавоноидов (по рутину), мг/100 г	2830±35

Производство последнего осуществляли холодным прессованием с последующим концентрированием до остаточного количества сухих веществ на уровне 62,5±2,5%. Жмых направляли на сушку до достижения остаточной влажности 13±1%.

В таблице 7.19 дан химический состав жмыха рябины сушеного и сока концентрированного.

Сделано заключение, что исследованные объекты могут служить источником эссенциальных макро- и микронутриентов. Основная часть сырья, подвергаемого исследованию – это высушенный жмых; процентное содержание – 87 %.; процентное содержание концентрированного сока – 64,9.

Таблица 7.19 – Химический состав концентрированного сока и жмыха рябины обыкновенной

Показатель, массовая доля	Сок	Жмых
Растворимых сухих веществ, %	65,0±3,9	86,8±2,5
Органических кислот (в пересчете на яблочную кислоту), %	14,1±1,7	2,7±0,3
Углеводов, г/100 г	54,6±5,7	23,3±1,8
Белка, г/100 г	4,7±1,2	1,9±0,6
Пектиновых веществ, г/100 г	17,2±1,2	14,9±1,9
Дубильных веществ, г/100 г	5,2±1,7	6,4±1,1
Золы, г/100 г	2,6±0,6	2,8±0,5
Натрия, мг/100 г	0,2±0,1	18,6±0,9
Калия, мг/100 г	107,5±15,6	862,9±35,0
Кальция, мг/100 г	33±3,2	186,4±12,8
Магния, мг/100 г	25±2,74	130,7±28,3
Фосфора, мг/100 г	8,1±0,7	118,8±19,3
Железа, мг/100 г	0,3±0,1	80,3±12,1
Витамина С, мг/100 г	205,3±26,9	97,2±8,6
β-каротина, мг/100 г	85,1±5,2	34,1±4,9
Биофлавоноидов (по рутину), мг/100 г	4050±110	3537±96

Вкус и цвет сока, его аромат и пищевую ценность формируют такие растворимые композиции, как витамины и белки, органические кислоты и минеральные вещества. Доля отдельных фракций в сухих веществах: углеводы – 54,6%, ягодный жмых – 23,1%.

Неусваиваемые организмом человека пектиновые вещества, «играют» существенную роль в метаболических процессах, а следовательно, их низкий уровень может служить источником желудочно-кишечных заболеваний, а также других патологий. Они входят в состав клетки и неклеточных образований, выполняя свою миссию как производные гиалуроновой кислоты.

Обращает на себя внимание протекторные функции пектина, заключающиеся в способности образовывать нетоксичные комплексы с тяжелыми

металлами и выводить их из организма. Этот же эффект выявлен и в отношении радиоактивных соединений. В этой связи следует отметить относительно высокое содержание в рябине пектиновых веществ – жмыхе 15,0%, соке 17,0%.

В исследуемых объектах установлено небольшое содержание белковых веществ и аминокислот. Поэтому сок и жмых не играют существенной роли в качестве источника белка в питании человека, учитывая, что его потребность определена на уровне 0,8 г/кг массы тела в сутки. То же самое относится к аминокислотному составу сока. В соке их содержится незначительное количество, как и в жмыхе, соответственно, г/100 г – 4,6 и 1,8.

Обязательными компонентами плодово-ягодного сырья являются органические кислоты, играющие важную роль при его хранении, обеспечивающие совместно с сахарами, вкусовые характеристики и сохраняемость. Другая функция органических кислот – стимуляция перистальтики кишечника и возбуждение секреции поджелудочной железы. Отмечено также бактерицидное действие, участие в метаболизме и выведение из организма уратов.

Значительный вклад в пищевую ценность продукции переработки плодово-ягодного сырья вносят витамины и витаминоподобные соединения. Ниже представлены данные соотношения физиологической потребности реальному количеству основных витаминов, характеризующих витаминный статус, что имеет немаловажное значение для научного обоснования их роли в обменных процессах.

Представленные в таблице 7.19 данные свидетельствуют о достаточно высоком количестве витаминов в высушенном жмыхе и концентрированном соке.

Продукты переработки рябины могут служить дополнительным источником аскорбиновой кислоты, количество которой составляет, мг/100 г: жмыхе – 97,3; соке – 205,4 (рекомендуемый уровень потребления витамина С находится на уровне 90 мг в сутки).

Пищевые достоинства жмыха и сока не исчерпываются содержанием отдельных биологически активных соединений. Они формируются также за счет

образующихся природных комплексов с направленными функциональными свойствами. Биохимическое действие биофлавоноидов наиболее активно проявляются при наличии аскорбиновой кислоты, которая, в свою очередь, стабилизируется в присутствии флавоноидов путем образования стабильных соединений [31]. Количество биофлавоноидов в жмыхе находится на уровне 3538, соке 4051 мг/100 г.

Каротиноиды осуществляют биохимические функции в качестве провитамина А. Это подтверждается исследованиями провитаминной активности каротиноидов независимо от их свойств. При этом отмечено снижение риска онкологических заболеваний, желудка, легких и пищевода. Установлена более высокая активность ликопина томатов по сравнению с β -каротином на примере поглощения свободных радикалов [39].

Количество каротина в жмыхе находится на уровне 34,2, соке 85,0 мг/100 г при рекомендуемом уровне потребления 5 мг в сутки.

В организме человека минеральные вещества входят в состав многочисленных органических соединений, активно участвуют в обменных процессах органов и тканей, являются структурными элементами биологических субстратов и жидкостей, эндокринных желез и ферментов, а также поддерживают жизненно важные процессы на необходимом функциональном уровне [142]. Общее содержание минеральных соединений в жмыхе находится на уровне 2,9, соке – 2,7 г/ 100 г.

В процессе переработки рябины и получения сока основной объем минерального состава остается в жмыхе, который характеризуется значительным содержанием калия. Значение этого минерала заключается в регуляции уровня воды в тканях организма и обеспечении сердечных и мышечных сокращений. Магний участвует в функционировании сердечной мышцы, контролирует состояние мышечной системы, поддерживая жизнедеятельность организма в целом

Минеральные вещества сока рябины находятся в легкоусвояемой форме, что обеспечивает их эффективность, несмотря на незначительный уровень содержания.

Соотношение магния и кальция в соке и жмыхе рябины близко к рекомендуемому и составляет 0,7:1.

Фосфор и его соединения являются необходимыми компонентами продуктов переработки плодово-ягодного сырья. Они участвуют в метаболизме кальция и магния, энергетическом обмене, входя в структуру белков и костей человеческого организма. В жмыхе и соке содержится железо, которое, не имея растительного происхождения, усваивается не более чем на 10 %. Следует сделать акцент на концентрированном соке, который достаточно хорошо растворим в воде и не содержит посторонние, в том числе минеральные примеси.

Одним из показателей качества, определяющим потребительский спрос на концентрированные соки, является их органолептическая характеристика, при положительной оценке которой обеспечиваются успешные рыночные предложения. Перечень этих показателей представлен в таблице 7.20.

Таблица 7.20 – Органолептические показатели концентрированного сока рябины обыкновенной

Показатель	ГОСТ Р 52185	Концентрированный сок рябины обыкновенной
Внешний вид и консистенция	Густая, вязкая, непрозрачная (прозрачная) жидкость	Прозрачная жидкость без осадка после отстаивания в течение 2-х часов
Цвет	Соответствующий цвету соков, из которых изготовлен концентрированный фруктовый сок. Допускается незначительное потемнение (покоричневение)	Светло-коричневый, с оранжевыми тонами
Запах	Свойственный фруктовым сокам, из которых изготовлен концентрированный сок. Посторонний запах не допускается	Свойственный рябине обыкновенной, без посторонних запахов
Вкус	Свойственный фруктовым сокам, из которых изготовлен концентрированный сок. Посторонний привкус не допускается	Приятный, вяжущий, сладкий, свойственный рябине обыкновенной

К органолептическим показателям исследуемого объекта относятся вкус, внешний вид, запах и цвет. Эти характеристики определяются за счет вкусовых, визуальных, обонятельных и осязательных ощущений

По своей сути органолептическая оценка представляет количественный и качественный анализ ответной реакции со стороны органов чувств. Полученные материалы по оценке сока свидетельствуют о соответствии испытуемых показателей требованиям ГОСТ Р 52185 и характеризуют его положительные потребительские характеристики

Проведены исследования показателей качества сока рябины (концентрированного) при хранении в условиях относительной влажности не более 75 % и температуры 4 ± 2 °С. В таблицах 7.21 и 7.22 даны результаты проведенных испытаний.

Таблица 7.21 – Изменение органолептических показателей концентрированного сока рябины обыкновенной при хранении

Показатель	Сентябрь	Декабрь	Март	Май
Внешний вид	0,79±0,06	0,73±0,07	0,70±0,07	0,65±0,07
Цвет	1,36±0,13	1,35±0,13	1,33±0,10	1,31±0,10
Консистенция	1,81±0,00	1,76±0,00	1,72±0,14	1,69±0,14
Вкус	3,53±0,00	3,51±0,00	3,46±0,00	3,37±0,28
Аромат	1,90±0,03	1,86±0,20	1,83±0,20	1,82±0,20
Типичность	0,5±0,00	0,50±0,00	0,50±0,00	0,50±0,00
Всего	9,89±0,37	9,71±0,25	9,54±0,22	9,34±0,14

Анализируя материалы исследований, следует отметить, что испытуемые показатели изменяются в зависимости от продолжительности хранения сока. Его внешний вид оставался неизменным и привлекательным с точки зрения товароведной оценки на протяжении всего периода хранения.

Оставались также неизменными и гармоничными консистенция, цвет, вкус и аромат.

Таблица 7.22 – Изменение физико–химических показателей концентрированного сока рябины обыкновенной при хранении

Показатель, массовая доля	Сентябрь	Декабрь	Март	Май
Растворимых сухих веществ, %	65,0±3,9	65,5±5,9	66,0±6,2	66,0±5,8
Титруемых кислот (в пересчете на яблочную кислоту), %	14,1±1,7	14,1±1,8	14,1±2,0	14,1±2,0
Углеводов, г/100 г	54,6±5,7	54,2±4,6	54,0±5,3	53,6±6,1
Золы, г/100 г	2,6±0,6	2,6±0,6	2,6±0,7	2,6±0,7
Витамина С, мг/100 г	205,3±26,9	203,1±23 1	200,0±22 8	197,3±2 0 7
β–каротина, мг/100 г	85,1±5,2	85,1±4,9	85,0±5,3	84,9±5,5

По окончании 9 месяцев хранения балльная оценка концентрированного плодово-ягодного сока снизилась незначительно, по сравнению с контролем (свежевыработанный сок) – всего на 0,54 балла, суммарное количество баллов находилось, в среднем, на уровне 9,35.

При хранении испытуемого объекта исследования наблюдались также изменения химического состава: незначительно увеличивалось количество сухих веществ (на 1,49 %) за счет потери влаги. Наблюдалась тенденция к уменьшению общего количества углеводных компонентов, потеря которых по окончании хранения находилась на уровне 1,89 %.

Что касается органических кислот, то их содержание соответствовало исходному количеству на протяжении всего периода хранения.

Установлена тенденция к снижению бета-каротина и витамина С. Возможно это объясняется активностью тканевых ферментов, вызывающих необратимые гидролитические процессы.

Потери аскорбиновой кислоты по окончании хранения находились на уровне 4 %, β-каротина, по сравнению с витамином С, слабо выражены и через 9 месяцев составили 0,23 %. Заданные показатели пищевой ценности концентрированного сока рябины за весь период хранения не изменялись.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что рассматриваемый объект исследования имеет относительно высокие показатели качества, которые отличаются стабильностью при хранении. Все это позволяет его использовать в производстве быстрорастворимых завтраков.

Расширение ассортимента функциональных продуктов быстрого приготовления может осуществляться за счет применения местного растительного сырья. Необходимым условием для решения этой задачи является обеспечение безопасности растительных ресурсов. Эта проблема связана с антропогенным воздействием на сырье, что приводит к его загрязнению и возникает аналогичная проблема с продуктами его переработки. Следует отметить, что продукты растительного происхождения не являются приоритетными источниками ксенобиотиков, но могут служить факторами риска в условиях интенсивного развития промышленности.

Рассматриваемая проблема проявляется наиболее остро в регионах с учетом их экологии, геохимических катаклизмов, состава почв, климатических и географических условий произрастания растений, их видовых особенностей [120,143].

Для Кемеровской области традиционно характерна экологическая проблема, учитывая интенсивное развитие угольной, металлургической и химической промышленности. Активная хозяйственная деятельность неизбежно приводит к загрязнению дикорастущих и культивируемых растений полициклическими ароматическими углеводородами, тяжелыми металлами, нитратами, радионуклеидами, пестицидами, другими многочисленными ксенобиотиками [121–123]. Становится очевидной необходимость в разработке специализированных пищевых продуктов с направленными действиями – детоксицирующими, лучезащитными, иммуностимулирующими, другим спектром функциональных свойств.

Следует отметить, что до сих пор в имеющихся нормативных документах отсутствуют нормативы содержания предельно допустимых концентраций вредных соединений, способных накапливаться в растительном сырье, за

исключением радионуклидов стронция-90, цезия-137 и 134, а также остаточного количества пестицидов в культивируемых и лекарственных растениях.

Содержание токсических веществ и их соединений в местном растительном сырье позволяет определить относительно благоприятные зоны для заготовок и, вместе с тем, исключить неблагоприятные загрязненные районы. Немаловажное значение имеет исследование, направленное на особенности и закономерности накопления ксенобиотиков в растительном сырье и продуктах их переработки [21, 120–123].

Проведены исследования по определению токсичных веществ в условиях переработки плодово-ягодного сырья. Выполнен токсикологический анализ жмыха концентрированного сока и плодов рябины с целью их дальнейшего использования в производстве завтраков. Полученные данные представлены в таблице 7.23.

Таблица 7.23 – Содержание токсичных элементов в плодах, концентрированном соке и жмыхе рябины обыкновенной**

Объекты исследования	Токсичные элементы, мг/кг		
	Cu (ПДК–10,0)*	Pb (ПДК–0,4)*	Zn (ПДК10,0)*
Ягода	0,44	0,029	1,28
Концентрированный сок	0,16	0,009	0,58
Жмых	0,21	0,015	0,63

* - [123]

** - в исследуемых образцах мышьяк не обнаружен

Проведено сравнение уровня токсичных веществ в исходном сырье с нормативными документами по их предельно-допустимой концентрации. Результаты исследования свидетельствуют о незначительном содержании испытуемых ксенобиотиков в плодах рябины и продуктах ее переработки, что служит основанием для их использования в производстве специализированных продуктов.

Материалы проведенной работы позволяют заключить, что токсичные

элементы плодов рябины в процессе её переработки в значительных количествах переходят не в сок, а в жмых.

Из испытываемых токсикантов наиболее опасным является свинец, который не принадлежит к эссенциальным нутриентам [222]. Большинство растительного сырья (овощного, дикорастущего, лекарственно-технического и культивируемого) способно к аккумуляции свинца, содержащегося в почвах [196]. Высокая токсичность этого элемента обусловлена большим коэффициентом его накопления в организме при незначительной скорости полнотой удаления.

Научное обоснование рецептуры и методики проектирования разрабатываемого продукта с использованием творожной сыворотки может быть синхронизировано с показателями физико-химических свойств при её сгущении.

Согласно литературным сведениям сгущенная сыворотка, перед её использованием в пищевых технологиях, не должна содержать сухих веществ выше 60% [80,233,263]. При таких условиях и температурных режимах 60–70°C она сохраняет текучесть, тогда как при более высокой концентрации не способна вытекать из выпарного аппарата. Другой проблемой в процессе переработки сыворотки может быть её повышенная кислотность, приводящая к увеличению пенообразования в процессе концентрирования, что снижает эффективность технологического этапа упаривания.

Экспериментальным путем подобраны режимы сгущения сока рябины с творожной сывороткой в соотношении по сухому веществу, 1:1,6. Процесс проводился в вакуум-выпарной установке при температуре греющей камеры $49 \pm 1^\circ\text{C}$ до стабильного уровня содержания сухих веществ – $57,5 \pm 2,5$ мас.%. При создании степени разряжения превышающей 4,8 кПа достигается температура кипения.

В таблице 7.24 представлены показатели качества испытываемого сырья.

Таблица 7.24 – Качественные характеристики смеси творожной сыворотки и сока рябины обыкновенной

Показатель, массовая доля	Содержание
Растворимых сухих веществ, %	60±1,6
Титруемых кислот (в пересчете на яблочную кислоту), %	7,2±1,0
Углеводов, г/100 г	49,2±4,1
Пектиновых веществ, г/100 г	6,2±0,7
Золы, г/100 г	2,4±0,4
Натрия, мг/100 г	0,18±0,05
Калия, мг/100 г	97,2±1,2
Кальция, мг/100 г	30,1±1,9
Магния, мг/100 г	22,5±1,1
Фосфора, мг/100 г	6,95±0,07
Железа, мг/100 г	0,27±0,05
Рибофлавина (В ₂), мг/100 г	0,88±0,01
Пиридоксина (В ₆), мг/100 г	0,27±0,02
Ниацина (РР), мг/100 г	1,24±0,04
Витамина С, мг/100 г	188,7±3,2
Ретинола (А), мг/100 г	0,083±0,003
Холина, мг/100 г	131,3±5,4
β-каротина, мг/100 г	77,1±2,1
Биофлавоноидов (по рутину), мг/100 г	3710±90

Как видно из таблицы 7.24, в смеси содержится значительное количество пектиновых соединений, бета-каротина, аскорбиновой кислоты, биофлавоноидов, пиридоксина и рибофлавина, что является свидетельством целесообразности ее использования в рецептуре завтрака.

7.2.2 Рецептурный состав

Разработаны различные рецептурные формулы быстрорастворимых завтраков с целью улучшения их пищевой ценности и функциональных свойств.

При создании рецептуры в качестве основных сырьевых компонентов применяли жмых рябины и крахмал, муку овсяную, сок, сыворотку творожную, которые характеризуются индивидуальной пищевой ценностью и направленным влиянием на организм человека.

Достоинство завтрака становится значимым при условии дополнительного введения витаминно-минерального премикса, обеспечивающего его эффективность и направленные функциональные свойства.

При разработке завтрака учитывалась органолептическая оценка различных вариантов его рецептур (таблица 7.25).

Таблица 7.25 – Варианты рецептур быстрорастворимых завтраков на основе молочной сыворотки и рябины обыкновенной

Наименование используемого сырья	Варианты				
	1	2	3	4	5
Сок рябины обыкновенной (с.в. 60 %),	8,1	10,0	6,0	7,5	5,0
Мука овсяная, %	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0
Сахарная пудра, %	28,0	19,1	29,0	17,0	18,0
Молочная сыворотка (с.в. 60 %), %	13,0	14,0	7,5	9,0	8,0
Жмых рябины обыкновенной, %	3,9	1,9	2,5	3,5	3,0
Крахмал	7,0	10,0	5,0	8,0	6,0
Итого:	100				

При анализе показателей качества испытуемых завтраков (гранулированных быстрорастворимых) применяли эталонную 20-балльную шкалу. Изучали готовый продукт с использованием органолептических показателей, предварительно его разводили в горячей воде.

Органолептические критерии продукта оценивали, исходя из следующих баллов: консистенция и внешний вид – 6; запах и вкус – 10; цвет – 4.

Аромату и вкусу отводилось наибольшее количество баллов – 50%. Готовый быстрорастворимый продукт характеризовался вязкой консистенцией за счет наличия в его составе овсяной муки в качестве структурообразователя.

Наличие комочков нерастворившейся манной муки в восстановленном продукте нарушает консистенцию и потребительские свойства испытуемого завтрака. на Цвет оценивался 4 баллами, консистенция и внешний вид – 6 баллов.

Сравнительная оценка органолептических показателей пяти вариантов завтраков дана в таблице 7.26.

Таблица 7.26 – Сравнительная органолептическая оценка качества различных вариантов быстрорастворимых завтраков

Наименование показателя	Варианты				
	1	2	3	4	5
Вкус и запах	9,8±0,10	9,65±0,25	8,90±0,35	8,6±0,45	8,40±0,30
Внешний вид и консистенция	6,0±0,00	6,00±0,00	5,90±0,49	5,60±0,00	5,30±0,00
Цвет	4,0±0,00	4,00±0,00	3,80±0,45	3,70±0,00	3,55±0,00
Комплексная оценка	19,8±0,10	19,65±0,20	18,60±0,30	17,90±0,35	17,25±0,35

Из данных таблицы следует, что испытуемые завтраки имеют неодинаковые количества баллов и различную комплексную оценку качества.

1-й вариант завтрака характеризуется ароматным, гармоничным и специфическим вкусом рябины на уровне 9,7–9,9 баллов. Отмечены приятный цвет – 4 балла и оптимальная консистенция – 6 баллов. В совокупности получена относительно высокая оценка (19,7–19,9 балла).

Завтраки 2-го варианта также получили высокую комплексную оценку на уровне 19,4–19,6 балла. Другие показатели отличались специфическим и гармоничным вкусом, с легким привкусом сыворотки и ароматом рябины (9,4 и 9,8 баллов), цвет приятный (4 балла), хорошая консистенция и привлекательный внешний вид (6 баллов).

Продукт 3-го варианта получил дегустационную оценку 18,6 баллов, вкус – слегка сладковатый с характерным слабым ароматом рябины (8,6–9,2 баллов), консистенция и внешний вид (5,4–6,4 баллов). Полученные данные позволяют позиционировать завтрак на достаточно высоком уровне качества.

Что касается 4 и 5-го вариантов, то характерной особенностью является недостаточный аромат и вкус рябины, что можно объяснить незначительным уровнем внесения сока и сахарной пудры. Излишнее наличие овсяной муки образует довольно густую консистенцию, не соответствующую качественным критериям. Комплексная оценка этих вариантов составляет соответственно 17,6–18,2 и 16,9–17,5 баллов.

Материалы проведенных органолептических исследований позволяют определить в качестве лучшего первый вариант завтрака, что послужило основанием для разработки рецептурного состава нового продукта с использованием витаминного премикса плодов рябины и сыворотки творожной (таблица 7.27).

Таблица 7.27. Рецепт быстрого растворимого гранулированного завтрака на основе молочной сыворотки и рябины обыкновенной, кг/100кг

Наименование сырья	Содержание сырья в готовом завтраке
Сок рябины обыкновенной (с.в. 60 %)	8,1
Мука овсяная	40,0
Сахарная пудра	27,9
Молочная сыворотка (с.в. 60 %)	13,0
Жмых рябины обыкновенной	3,8
Крахмал	7,0
Премикс «Валетек-3»	0,2
Итого	100

Быстрорастворимый завтрак отличается содержанием натуральных ингредиентов с направленной биологической активностью и общеукрепляющими свойствами. Овсяная мука, входящая в состав завтрака, обладает способностью восстанавливать функции пищеварения и обмен холестерина в крови, снижая его содержание. Повышается умственная и физическая активность, отмечены положительные свойства сока рябины – кровоостанавливающие, противогипотензивные, вяжущие, противовоспалительные, мочегонные.

В состав завтрака введены витамины в виде высокоэффективного премикса, который характеризуется сбалансированным составом в количественном и качественном отношении, хорошей биодоступностью. Следует отметить удобство дозирования витаминов, их контроля определения и возможность равномерного распределения.

Быстрорастворимый завтрак прост в приготовлении – восстанавливается водой при $87,5 \pm 2,5^\circ\text{C}$ в течение 40 секунд. Цвет готового продукта светлорозовый, вкус сыворотки кисло-сладкий, гармоничный с запахом рябины.

Разрабатываемый пищевые концентрат представляет собой надежное средство повышения адаптационных возможностей организма к вредным факторам внутренней и внешней среды за счет содержания в рецептурном составе биологически активных веществ и их комплексов с иммуномодулирующими и протекторными свойствами.

Гранулированный завтрак обогащен витаминно-минеральным комплексом, что обеспечивает содержание в нем соответствующих эссенциальных нутриентов в рекомендованных количествах для этой группы пищевой продукции [35, 222]. Заданное количество витаминов и минеральных веществ гарантированно обеспечивает не менее 25% потребности организма в сутки при условии потребления рекомендуемого количества завтрака.

7.2.3 Технология производства

Технологическая схема изготовления гранулированных полидисперсных пищевых концентратов с использованием рябины и творожной сыворотки показана на рисунке 7.2.

Исходя из представленной схемы, исходное сырье предварительно очищают от травы, листьев, других примесей и направляют на мойку для удаления земли, грязи и др. Мойка обеспечивает также снижение микробиологической обсемененности, после которой сырье инспектируют, удаляя посторонние примеси, незрелые, гнилые и мятые плоды.

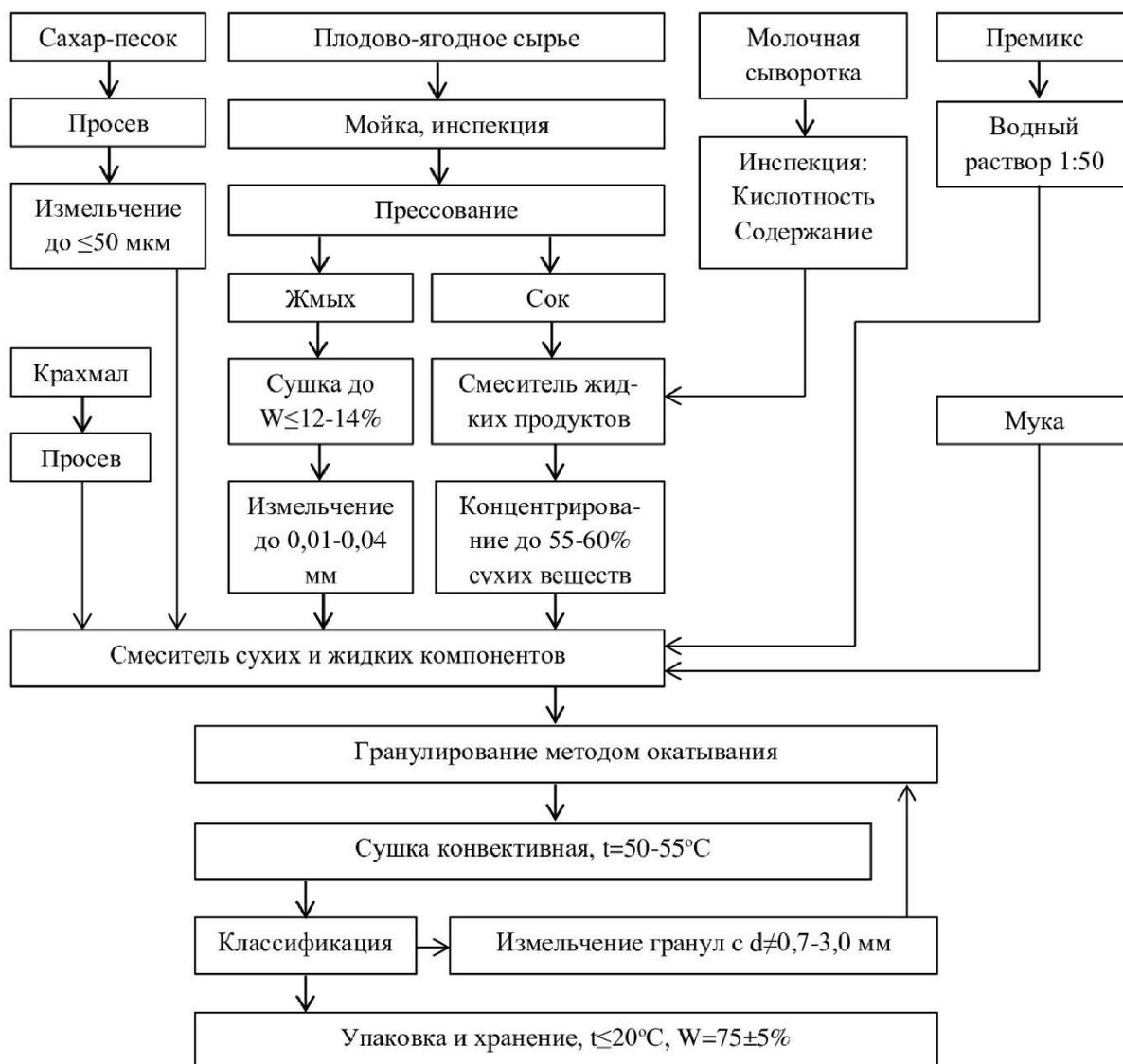


Рисунок 7.2 - Схема технологического производства гранулированного завтрака с использованием обыкновенной рябины и молочной сыворотки

По окончании процесса инспекции подготовленное сырье направляют на прессование с применением корзиночно-пакетных прессов периодического действия.

Следующий этап производства заключается в сушке полученного жмыха при $52,5 \pm 2,5^\circ\text{C}$ до достижения остаточной влаги на уровне $13 \pm 1\%$. Сухой жмых подвергают измельчению до размера частиц $0,025 \pm 0,015\ \text{мм}$.

Сок, получаемый в результате прессования, направляют в смеситель одновременно с заданным количеством творожной сыворотки. Процесс смешения направлен на получение однородной массы из рецептурных ингредиентов.

Проводят концентрирование сока рябины с сывороткой творожной в соотношении 1:1:6 с использованием вакуум-выпарной установки: регулируемые параметры – температура греющей камеры $49\pm 1^\circ\text{C}$, остаточное давление – не более 4,8 кПа.

Эти условия гарантируют стабильность термолабильных нутриентов, а также химическую и микробиологическую стойкость получаемых концентратов. Процесс концентрирования до достижения остаточного количества сухих веществ на уровне $62,5\pm 2,5\%$ [188].

Следующий этап производства заключается в смешении жидких и сухих ингредиентов: сок рябины и сыворотка творожная в виде концентрированной смеси; премикс (водный раствор); овсяная мука; сахар-песок измельченный; жмых сухой; крахмал.

Полученная смесь поступает в тарельчатый гранулятор в количестве $75\pm 5\%$ от жидкой фазы. В гранулятор дополнительно вводится активатор, обеспечивающий интенсивное зародышеобразование, однородность гранул и повышение производительности. Этот способ гранулирования получил название «полумокрый». В грануляторе происходит также доувлажнение смеси.

Применяемый способ окатывания не влияет на скоростной режим формирования гранул, исключает пылеобразование. Отличительной особенностью применяемого процесса агломерирования является его достаточно легкая регуляция. Жидкость, используемая для грануляции, дозируется в смеситель-гранулятор исходя из количества используемого сырья.

Готовые гранулы пищевого концентрата направляют на сушку в специальную сушильную камеру при температуре $52,5\pm 2,5^\circ\text{C}$ до содержания остаточной влаги на уровне $8,5\pm 0,5\%$. Затем гранулы классифицируются по размерам путем пропускания через вибросито. Продукция с верхней и нижней частей сита направляется на измельчение и дальнейшую технологическую переработку. Готовый гранулированный завтрак фасуют, упаковывают и направляют на хранение.

7.2.4 Исследование потребительских свойств. Определение регламентированных показателей качества, пищевой ценности, сроков и режимов хранения

При разработке новых продуктов, как это было отмечено выше, немаловажным фактором являются органолептические показатели, которые формируются входящими в его состав компонентами (таблица 7.28).

Таблица 7.28 – Органолептические показатели полидисперсного гранулированного завтрака на основе молочной сыворотки и рябины обыкновенной

Наименование показателя	Характеристика	
	Концентрат	Готовый завтрак
Внешний вид	Компактные, плотные, округлой формы с матовой поверхностью, однородные равномерно окрашенные гранулы	Свойственный завтраку, приготовленному по способу указанному на этикетке
Цвет	Свойственный используемому виду плодово-ягодного сырья, от более насыщенного в концентрате до менее насыщенного в готовом завтраке, допускается более светлый тон	
Вкус и запах	Свойственные сыворотке и рябине обыкновенной, посторонние запахи и привкусы не допускаются	
Консистенция	Однородные гранулы размером от 0,7 до 3,0 мм	Вязкая однородная масса с включениями плодовой мякоти

Результаты органолептических исследований разработанного пищевого концентрата завтрака характеризуют положительно его потребительские свойства, которые не уступают таковым у других пищевых продуктов аналогичных групп.

Изучены физико-химические показатели и ингредиентный состав гранулированного, быстрорастворимого завтрака. Результаты исследования представлены в таблице 7.29.

Таблица 7.29 – Физико–химические показатели качества быстрорастворимого полидисперсного гранулированного завтрака на основе молочной сыворотки и рябины обыкновенной

Наименование показателя	Значение показателя
Массовая доля влаги, % не более	9,0
Массовая доля сахарозы, %	53,2±5,1
Массовая доля белка, %	4,5±0,3
Массовая доля жира, %	2,5±0,02
Массовая доля золы, %	1,9±0,4
Массовая доля титруемых кислот (в пересчете на яблочную кислоту), %	1,0±0,2
Массовая доля пектиновых веществ, %	0,70±0,04
Растворимость, сек, не более	40,0
Гранулометрический состав:	
– остаток на сите 0,5 мм, %, не более	98,0
– остаток на сите 2,0 мм, %, не более	0,5

Анализ представленных в таблице данных характеризует испытуемые показатели как допустимые в пределах установленных нормативов для рассматриваемой группы пищевых продуктов

Полученные материалы подтверждают правильность разработанных параметров и регулируемых технологических режимов изготовления пищевого концентрата, обеспечивающих формирование качественных характеристик.

С учётом нутриентного состава рецептуры завтрака рассчитаны показатели энергетической ценности гранулированного полуфабриката – 362 ккал на 100 г и восстановленного концентрата (напитка) – 90 ккал на 200 см³.

Обзор литературного материала показывает, что в процессе хранения пищевых концентратов наблюдается значительное снижение концентрации микроорганизмов, вызывающих порчу. В других исследованиях получены противоречивые показатели, касающиеся состояния микрофлоры в этой группе продуктов, в том числе факт обнаружения микроорганизмов из группы кишечной палочки [173].

С учетом этого проведены исследования по микробиологическим критериям безопасности разработанного продукта (таблица 7.30).

Таблица 7.30 – Микробиологические показатели свежевываботанного быстрорастворимого завтрака

Наименование показателя	Норма	Результаты исследований
КМАФАнМ, КОЕ/г, не более	$5 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^2$
БГКП (колиформы), в 1 г продукта	Не допускается	Не обнаружено
S.Aureus, в 1 г продукта	Не допускается	Не обнаружено
Патогенные, в т.ч. сальмонелла, в 25 г продукта	Не допускается	Не обнаружено

Проведены исследования санитарно-токсикологических показателей (таблица 7.31).

Таблица 7.31 – Содержание токсичных элементов и пестицидов в гранулированном завтраке на основе молочной сыворотки и рябины обыкновенной, мг/кг

Наименование показателя	Норма, не более	Результаты исследований
Свинец	0,5	0,05
Мышьяк	0,5	Не обнаружено
Кадмий	0,1	Не обнаружено
Ртуть	0,02	Не обнаружено
Медь	10,0	1,2
Цинк	30,0	1,7
Пестициды:		
– гексахлорциклопексан;	0,1	Не обнаружено
– ДДТ и его метаболиты	0,1	Не обнаружено

Материалы таблиц 7.30 и 7.31 показывают, что по испытываемым критериям безопасности и содержанию ксенобиотиков сухой завтрак возможен для употребления в пищу в соответствии с действующими нормативными актами

Известно, что одним из приоритетных направлений в области развития производства специализированных продуктов является разработка обогащенных продуктов эссенциальными макро- и микроэлементами. Хронический дефицит в их употреблении негативно влияет на функциональное состояние организма человека, его умственную и физическую работоспособность, иммунитет, самочувствие, снижается сопротивляемость к различным негативным факторам воздействия внешней и внутренней среды, являющихся фактором риска возникновения инфекционных, простудных, профессиональных и других заболеваний, задерживается их терапия, что, в целом, приводит к неоправданным социальным и экономическим потерям.

Включение витаминных комплексов в состав обогащаемых продуктов должно гарантировать не менее $\frac{1}{3}$ поступающих с рационом витаминов при учете суточных норм и употребления в рационе рекомендуемого количества завтрака (200 г). Результаты комплексных испытаний свидетельствуют, что разработанный завтрак по своим физико-химическим характеристикам, потребительским и функциональным свойствам соответствует специализированным продуктам питания (таблица 7.32).

Инновационная технология разработки завтраков предопределяет необходимость разработки регламентируемых качественных характеристик (органолептических, физико-химических, пищевой ценности), которые являются основой для обоснования сроков их реализации.

Гранулированные завтраки позиционируются как продукты пищевого концентрата с повышенным сроком хранения. Для обеспечения этих показателей необходимы соответствующие условия (температура, влажность и др.), нарушение которых приводит к отрицательным изменениям потребительских свойств и функциональных свойств разрабатываемого завтрака.

Для определения режимов хранения пищевого концентрата исследовалась динамика изменений показателей качества в процессе хранения.

Таблица 7.32 – Содержание витаминов и минералов в 200 см³ восстановленного быстрорастворимого полидисперсного завтрака (25 г сухого концентрата)

Витамины	Содержание, мг (без премикса)	Содержание, мг (с премиксом)	Адекватный (верхний допустимый) уровень
1	2	3	4
Витамин А	0,003	0,15	1,0 (3,0)
Витамин Д	0,009	0,01	0,005 (0,015)
Витамин Е	0,002	1,25	15,0 (100,0)
Витамин В ₁	0,044	0,24	1,7 (5,1)
Витамин В ₂	0,038	0,36	2,0 (6,0)
Витамин В ₆	0,07	0,33	2,0 (6,0)
Витамин РР	0,38	2,75	20,0 (60,0)
Пантотеновая	0,07	1,07	5,0 (15,0)
Витамин В ₁₂	0,0002	0,0006	0,003 (0,009)
Фолиевая кислота	0,009	0,07	0,4 (0,6)
Биотин	0,001	0,028	0,05 (0,15)
Витамин С	5,69	22,69	70,0 (700,0)
Холин	15,8	15,8	500 (1000)
β-каротин	1,8	1,8	5,0 (10,0)
Биофлавоноиды	117,6	117,6	85,0 (120,0)
Натрий	2,06	2,06	–
Калий	36,45	36,45	2500,0 (3500,0)
Кальций	12,56	12,56	1250,0 (2500,0)
Магний	8,09	8,09	400,0 (800,0)
Фосфор	44,21	44,21	800,0 (1600,0)
Железо	1,01	1,01	15,0 (45,0)
Марганец	0,11	0,11	2,0 (11,0)
Медь	0,04	0,04	1,0 (5,0)
Цинк	0,13	0,13	12,0 (40,0)

Следует отметить, что регулируемые параметры (влажность, температура) – одни из определяющих в области сохранения нативных и приобретаемых характеристик разрабатываемого продукта. Их изменения в процессе хранения могут быть причиной нежелательных изменений органолептических, физико-

химических и потребительских свойств, приводит к развитию нежелательной микрофлоры и разрушению витаминов.

При хранении завтрака использовались следующие условия: температура – 18-22°C; относительная влажность – 70-80%. По окончании технологического процесса готовый продукт упаковывали в тару (пластиковые банки), разрешенные органами Госсанэпиднадзора.

Данные дегустационного анализа и физико-химических исследований завтрака, на протяжении 9 месяцев его хранения, представлены в таблице 7.33.

Таблица 7.33 – Динамика изменений органолептических и физико-химических показателей качества быстрорастворимого полидисперсного гранулированного завтрака в процессе хранения

Наименование показателя	Продолжительность хранения, мес.			
	0	3	6	9
Запах и вкус, балл	9,8±0,1	9,8±0,15	9,79±0,15	9,75±0,2
Цвет, балл	4,0±0,00	4,00±0,00	4,00±0,00	4,00±0,00
Внешний вид и консистенция, балл	6,0±0,00	6,00±0,00	5,92±0,05	5,83±0,15
Суммарная балльная оценка, балл	19,8±0,10	19,8±0,15	19,71±0,20	19,58±0,35
Массовая доля сахарозы, %, не менее	53,2±5,1	53,1±4,9	52,90±4,35	52,8±5,0
Массовая доля титруемых кислот (в пересчете на яблочную кислоту), %	1,0±0,2	1,05±0,15	1,05±0,15	1,15±0,10
Растворимость, сек	40,0±1,0	41,0±1,0	42,0±1,5	42,0±2,0
Гранулометрический состав:				
– остаток на сите 0,5 мм, %, не более	98,00±1,1	98,00±1,1	98,00±1,1	98,00±1,1
– остаток на сите 2,0 мм, %, не более	0,50±0,01	0,50±0,01	0,50±0,01	0,50±0,01
Массовая доля влаги, %	9,00±0,05	9,05±0,05	9,25±0,10	9,40±0,10

Как видно из приведенных данных, по окончании указанного срока хранения показатели органолептической характеристики завтрака не претерпевали каких-либо изменений. Незначительные отклонения отмечены лишь по окончании хранения – наблюдалась тенденция к снижению интенсивности света и комкованию. Причиной дефекта комкования может быть когезия, когда, при определённых условиях частицы продукта способны притягиваться друг к другу. Этот процесс может быть вызван изменением содержания влаги, её прослойки между частицами, что служит причиной возникновения капиллярных сил.

В процессе 9 месяцев хранения, при 18–22°C, содержание влаги в продукте повышалось до 9,4%, что также может быть причиной комкования. Цвет пищевого концентрата не изменялся по сравнению с исходными образцами, каких-либо посторонних запахов и послевкусы не выявлено, показатели физико-химической характеристики фактически не изменились.

Отмечено снижение скорости растворения сухого завтрака с 40 секунд до 42.

В таблице 7.34 показаны результаты микробиологических исследований испытуемых завтраков при хранении.

Таблица 7.34 – Микробиологическая обсемененность быстрорастворимого завтрака в процессе хранения

Показатель	Норма	Срок хранения, месяцы			
		0	3	6	9
КМАФАнМ, КОЕ/г, не более	$5 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	$6,5 \cdot 10^3$
БГКП (колиформы), в 1 г продукта	Не допускается	Не обнаружено			
S.Aureus, в 1 г продукта	Не допускается	Не обнаружено			
Патогенные, в т.ч. сальмонеллы, в 25 г продукта	Не допускается	Не обнаружено			

Результаты свидетельствуют об отсутствии допустимых изменений по микробиологическим критериям безопасности.

На основе полученных материалов сделано заключение, что быстрорастворимый завтрак, произведенный с использованием обыкновенной рябины и сыворотки творожной, обладает относительно высокими потребительскими свойствами (органолептическими и физико-химическими) и незначительной микробиологической обсемененностью. Эти данные послужили обоснованием для определения сроков хранения – не более 6 месяцев со дня окончания технологического процесса при вышеназванных параметрах.

На основе полученных материалов сделано заключение, что быстрорастворимый завтрак, произведенный с использованием обыкновенной рябины и сыворотки творожной, обладает относительно высокими потребительскими свойствами (органолептическими и физико-химическими) и незначительной микробиологической обсемененностью. Эти данные послужили обоснованием для определения сроков хранения – не более 6 месяцев со дня окончания технологического процесса при вышеназванных параметрах.

Восстановление гранулированного завтрака осуществляют путем растворения 25 г концентрата в 200 см³ воды при температуре 87,5±2,5°С. Это количество сухого концентрата обеспечивает четвертую часть суточной нормы человека в витаминах. Для детского населения в возрасте до 6 лет рекомендуемая норма составляет 100–120 см³ завтрака, в возрасте 7–12 лет это количество увеличивается до 150 см³.

Материалы проведенных исследований положены в основу разработки и утверждения технической документации на производство быстрорастворимого гранулированного завтрака:

– «Завтрак гранулированный на основе молочной сыворотки». Технические условия (с изменениями и дополнениями)» ТУ 9196-001-16362254-19 (приложение В).

– «Технологическая инструкция «по производству завтрака гранулированного на основе молочной сыворотки» (приложение Г).

Глава 8. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА БЫСТРОРАСТВОРИМЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ КИСЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ

Наряду с моделированием и разработкой технологии быстрорастворимых гранулированных завтраков на основе молочной сыворотки была разработана (также с использованием моделирования технологического потока) имеющая свои особенности технология производства быстрорастворимых гранулированных киселей.

8.1 Гранулированный кисель на основе аронии черноплодной и молочной сыворотки

8.1.1 Технология производства

Предложена новая технология производства, установлены регулируемые технологические параметры гранулированного пищевого концентрата с использованием сыворотки творожной и черноплодной рябины. Технология производства в виде схемы на рисунке 8.1.

Исходное плодово-ягодное сырье проверяют по качеству, анализируя сопроводительные документы, направляют на мойку, сушат, измельчают и проводят ферментативный гидролиз. Процесс ферментации осуществляется при $42,5 \pm 2,5^\circ\text{C}$ и концентрации водородных ионов – $pH\ 4,9 \pm 0,1$. Количество используемого фермента составляет 0,031% от массы испытуемого продукта. Максимальный выход растворимых веществ служил основанием для определения продолжительности ферментации, которое равнялось 4 часам. По окончании 2 часов регистрировался максимальный выход растворимых веществ. Массовую долю растворимых сухих веществ определяли рефрактометрическим методом.

После завершения процесса ферментации субстрат подвергают сепарированию, разделяя его на мезгу и сок. Последний направляют в вакуум-

выпарной аппарат для сгущения при $52,5 \pm 2,5^\circ\text{C}$. Массовая доли сухих веществ $57,5 \pm 2,5\%$ служит критерием для окончания сгущения.



Рисунок 8.1 - Технологическая схема производства быстрорастворимого гранулированного киселя из аронии черноплодной и творожной сыворотки

Перед процессом сгущения проводят тепловую обработку сока аронии в вакуум-выпарном агрегате. Пастеризацию осуществляют на протяжении $17,5 \pm 2,5$ секунды при 72°C .

Образовавшуюся после сепарирования мезгу подвергают сушке при $52,5 \pm 2,5^\circ\text{C}$ до содержания остаточной влаги в среднем на уровне 11%, подвергают измельчению на дезинтеграторе до частиц размером 0,15 мм.

Компоненты, входящие в состав продукта, смешивают: сгущенный сок, высушенный ягодный шрот, просеянный пищевой крахмал и сахарная пудра.

Температурные режимы обработки ингредиентов – 50°C и сгущение жидких компонентов до содержания сухих веществ 60%, обусловлены рабочей влажностью гранулирования, которая имеет узкий интервал (50–60%), кроме того низкая температура сушки и сгущения являются щадящими режимами, обеспечивающими стабильность витаминной ценности плодово-ягодного сырья.

Смесь после тщательного перемешивания направляют в гранулятор (тарельчатый), в который предварительно вводят диспергатор, способствующий более активному зародышеобразованию, повышению производительности и получению однородных по размеру гранул.

Проводят корректировку объема жидкой фазы до оптимальной величины, используя присадку – сухой арониевый кисель после сортировки на вибросите с содержанием сухих веществ на уровне $92,5 \pm 2,5\%$.

Гранулированный кисель с количеством сухих веществ $82,5 \pm 2,5\%$ направляют на досушивание в сушилку при $52,5 \pm 2,5^\circ\text{C}$; при массовой доле сухих веществ $92,5 \pm 2,5\%$ процесс досушивания прекращают.

Сухие гранулы направляют на вибросито, где происходит их сортировка, затем в бункер-накопитель. Оставшееся количество с нижней и верхней части сита идет на измельчение и дальнейшую переработку.

Готовую форму киселя фасуют в материалы, разрешенные Роспотребнадзором, хранят не более 6 месяцев при температуре, не превышающей 20°C и влажности не выше 75%.

8.1.2 Исследования показателей безопасности при хранении. Определение регламентируемых показателей качества, сроков и режимов хранения

Изучены показатели безопасности при сравнении с допустимыми уровнями нормативных документов [35, 120, 197] (таблица 8.1).

Таблица 8.1 - Санитарно-гигиенические показатели безопасности быстрорастворимого гранулированного киселя

Наименование показателя	Результаты исследований	Норма
БГПК (колиформы), в 1 г продукта	не обнаружено	не допускается
<i>S. aureus</i> , в 1 г продукта	не обнаружено	не допускается
Патогенные, в том числе сальмонелла, в 50 г продукта	не обнаружено	не допускается

Имеющиеся экологические проблемы свидетельствуют о целесообразности внимания к содержанию в продуктах ксенобиотиков.

В таблице 8.2 представлены данные по содержанию в киселе токсичных элементов.

Таблица 8.2 - Содержание токсичных элементов и тяжелых металлов в быстрорастворимом гранулированном киселе из аронии черноплодной

Наименование показателя, мг/кг, не более	Результаты исследований	Норма
Свинец	0,25	0,50
Мышьяк	0,35	0,50
Кадмий	не обнаружено	0,10
Ртуть	не обнаружено	0,02
Медь	0,20	10,0
Цинк	0,10	30,0
Пестициды:		
- гексахлорциклогексан	не обнаружено	0,10
- ДДТ и его метаболиты	не обнаружено	0,10

Из таблиц 8.1 и 8.2 следует, что испытуемый кисель, гранулированный быстрорастворимый арониевый, не противоречит по своим критериям безопасности требованиям нормативных документов.

Исследования по определению регламентируемых показателей качества включали определение органолептических и физико-химических показателей. Результаты представлены в таблицах 8.3 и 8.4. Исследование сохраняемости киселя осуществляли при следующих параметрах:

Таблица 8.3 - Органолептические показатели быстрорастворимого гранулированного киселя

Наименование показателя	Характеристика	
	гранул	готового киселя
Внешний вид	Компактные, плотные, равномерно окрашенные, округлой формы гранулы размером 1-3 мм	Свойственные киселю, приготовленному по способу указанному на этикетке
Цвет	Темно-бордовый, от более насыщенного в концентрате до мене насыщенного в готовом киселе	
Вкус и запах	Свойственные черноплодной рябине, посторонние запах и привкус не допускается	
Консистенция	Сыпучая однородная масса порошка	Вязкая однородная масса с включениями плодовой мякоти

Таблица 8.4 - Физико-химические показатели быстрорастворимого гранулированного киселя

Наименование показателя	Характеристика
Массовая доля сухих веществ, %, не менее	97,5
Массовая доля сахарозы, % не менее	60,0
Массовая доля минеральных веществ, мг/100 г:	
Кальций	70,0±0,40
Фосфор	13,0±0,08
Калий	58,0±0,08
Натрий	5,9±0,20
Железо	2,5±0,04
Массовая доля витамина С, мг/100 г, не менее	20,5±0,5
Массовая доля биофлавоноидов, мг/100 г, не менее	2800±50
Растворимость, с, не более	20

– температурный режим на уровне $21,5 \pm 1^\circ\text{C}$, влажность окружающей среды не более 80%;

– низкая плюсовая температура $5 \pm 1^\circ\text{C}$, при аналогичной влажности 80%;

– увеличенные температурные режимы – $389\pm 1^\circ\text{C}$, также при указанной величине (80%).

Названные параметры соответствуют создаваемым условиям в термостатной камере.

При проведении лабораторных испытаний продукт предварительно упаковывали в пакетики массой 30 г.

Образцы изучали в течение предполагаемого срока хранения – 6 месяцев через каждые 30 дней, по истечении указанного срока исследования сокращали до 1 раза через 3 месяца при общем сроке испытаний – 1 год.

По окончании годичного исследования каких-либо изменений в органолептических показателях продукта не наблюдалось как при первом – $21\pm 1^\circ\text{C}$, так и во втором – $5\pm 1^\circ\text{C}$ режимах. При хранении киселя при комнатной температуре отмечено незначительное комкование и изменения интенсивности цвета; причиной дефекта комкования может быть возникающая способность частиц притягиваться друг к другу (когезия). На эту способность может оказывать концентрация влаги в пищеконцентрате. Это объясняется возможным образованием прослойки жидкости между частицами гранул и образованием капиллярных сил. Полученные экспериментальные данные подтвердили изменение влажности в продукте и появление комкования при $21\pm 1^\circ\text{C}$ по истечении 1 года. При этом такой показатель сухого продукта как растворимость, остался неизменным.

При хранении гранулированного арониевого киселя в термостате выявлены незначительные отклонения в консистенции и внешнем виде по окончании 3 месяцев. При этом пищеконцентрат был спрессован в виде трудно измельчаемой массы. Цветовые характеристики продукта оставались неизменными при сравнении с образцами, хранившимися при других режимах. Не наблюдались изменения в появлении посторонних запахов и привкусов.

Наблюдалось снижение скорости растворения сухого киселя с 20 до 90 секунд.

По истечении трех месяцев хранения в условиях повышенной температуры испытуемый кисель утратил свои потребительские свойства, поэтому дальнейшие исследования качественных характеристик не проводились.

Отмечено, что повышенная температура хранения приводит к уменьшению скорости растворения киселя, другим физико-химическим изменениям. Это объясняется изменением структуры гранулы: снижается показатель пористости, который служит одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на растворимость.

В таблице 8.5 показаны изменения скорости растворения сухого пищевого концентрата при хранении и различных температурах.

Таблица 8.5 - Изменение скорости растворения сухого гранулированного киселя в процессе хранения при различных температурных режимах

№ п/п	Температурные режимы хранения	Период хранения, мес								
		-	1	2	3	4	5	6	9	12
Скорость растворения, сек										
1	20-22 °С	20	20	20	20	20	20	20	20	30-35
2	4-6 °С	20	20	20	20	20	20	20	20	20
3	38-40 °С	20	20	35-45	90	снят с изучения				

Скорость растворения продукта при температурных условиях хранения $21 \pm 1^\circ\text{C}$ и $5 \pm 0^\circ\text{C}$ не изменяется на протяжении 9 месяцев. В условиях пониженных температур гранулы киселя отличаются стабильностью этого показателя по истечении 1 года. В условиях комнатной температуры, к 12 месяцу, скорость растворения незначительно снижается до 30–35 секунд. При термостатировании образцов продукта отмечена тенденция к снижению растворения сухого киселя. Этот показатель, уже на втором месяце, находился на уровне 40 ± 5 секунд, через три месяца составил 90 секунд.

Наряду с органолептическими показателями изучены изменения химического состава пищевого концентрата, происходящие в процессе хранения. По истечении шести месяцев хранения в комнатных условиях, а также при более низких температурах состав продукта не изменялся. После 1 года хранения витаминная ценность претерпела несущественные изменения.

Известно, что пищевая концентратная продукция характеризуется более высоким содержанием нутриентов на единицу объема. В этой связи какие-либо нарушения условий и режимов хранения могут привести к развитию нежелательных микроорганизмов и порче продукта. Изучение испытуемого киселя на основе аронии черноплодной по показателям микробиологической обсеменённости не выявили каких-либо изменений при сравнении с допустимыми уровнями (таблица 8.6).

Таблица 8.6 - Изменение микробиологических показателей сухого гранулированного киселя в процессе хранения

Наименование показателя	До хранения	После 12 мес хранения
БГПК (колиформы), в 1 г продукта	не обнаружено	не обнаружено
<i>S. aureus</i> , в 1 г продукта	не обнаружено	не обнаружено
Патогенные, в том числе сальмонелла, в 50 г продукта	не обнаружено	не обнаружено

Изучены органолептические критерии качества – консистенция, внешний вид, цвет, вкус и запах, что положено в основу определения срока годности разрабатываемого продукта.

По истечении 6 месяцев хранения сухого напитка видимых изменений указанных показателей не обнаружено. Все испытуемые образцы киселя имели высокие показатели сенсорной оценки.

Установлено, что при хранении в условиях пониженных положительных температур (4–6°C) и в режиме комнатной (21±1°C) исследуемый пищевая концентрат по окончании 6 месяцев хранения не изменил своих свойств по показателям качества. При этом сроки испытания продукта превышали по своей длительности в 2 раза заданный срок хранения (коэффициент запаса). К концу года существенных изменений физико-химического, микробиологического и органолептического состава не наблюдалось.

Результаты выполненных испытаний послужили основанием для определения регламентируемых критериев качества для разработки технических условий и технологических инструкций (технической документации на

производство быстрорастворимых гранулированных плодово-ягодных киселей). Образцы продукции были направлены в Госсанэпиднадзор; на основе результатов этих исследований выдано санитарно-эпидемиологическое заключение.

8.2 Гранулированный витаминизированный кисель с использованием овсяной муки, картофельного крахмала, яблочного, лимонникового и облепихового соков, стевии и фруктозы

8.2.1 Разработка рецептур

Рецептура функциональных быстрорастворимых киселей (ФБК) с заданными потребительскими свойствами формировалась с учётом синергических, биохимических и фармакологических свойств ингредиентов и их действующих начал. Это выражалось в необходимости повышения положительного влияния компонентов рецептуры на функциональные свойства продукта. Изучен химический состав плодовоовощного сырья (таблица 8.7).

Таблица 8.7. Химический состав свежего плодовоовощного сырья

Показатель	Облепиха	Яблоки	Лимонник	Топинамбур
Сухие вещества, %	16,0 \pm 2,4	16,6 \pm 2,3	18,6 \pm 2,9	22,0 \pm 3,1
Органические кислоты, %	2,8 \pm 0,14	1,2 \pm 0,04	6,4 \pm 0,44	0,1 \pm 0,01
Сахара, %	6,8 \pm 0,33	11,9 \pm 0,49	9,8 \pm 0,50	12,9 \pm 1,11
Азотистые вещества, %	0,6 \pm 0,02	0,4 \pm 0,02	0,1 \pm 0,01	2,4 \pm 0,12
Липиды, %	3,2 \pm 0,50	0,3 \pm 0,01	0,1 \pm 0,01	0,2 \pm 0,01
Пектиновые вещества, %	1,4 \pm 0,05	2,6 \pm 0,15	1,6 \pm 0,05	3,2 \pm 0,19
Зола, %	0,7 \pm 0,03	0,5 \pm 0,01	0,4 \pm 0,01	0,5 \pm 0,02
Натрий, мг /100 г	4,2 \pm 0,22	28,0 \pm 3,1	5,4 \pm 0,21	2,8 \pm 0,32
Калий, мг/100 г	182,0 \pm 8,40	284,0 \pm 10,1	59,0 \pm 2,9	210,0 \pm 8,90
Кальций, мг /100 г	23,0 \pm 3,90	15,0 \pm 2,3	5,0 \pm 0,21	18,0 \pm 3,10
Магний, мг /100 г	32,0 \pm 4,40	10,0 \pm 0,54	6,0 \pm 0,29	11,1 \pm 2,60
Фосфор, мг /100 г	10,0 \pm 0,51	12,0 \pm 0,64	12,5 \pm 0,55	81,0 \pm 4,70
Витамин С, мг /100 г	231,1 \pm 11,4	34,1 \pm 4,9	67,4 \pm 0,32	26,2 \pm 1,70
β -каротин, мг /100 г	163,0 \pm 8,21	31,4 \pm 4,0	0,2 \pm 0,01	8,4 \pm 0,68
Витамин Е, мг /100 г	5,2 \pm 0,27	0,25 \pm 0,01	2,2 \pm 0,14	0,14 \pm 0,01

Показано, что такие сырьевые компоненты как топинамбур, облепиха, яблоки и лимонник обладают поливитаминными свойствами, являясь источником природных поливитаминных комплексов, других биологически активных соединений, что представляется важным и обоснованным для создания продукции в области здорового питания.

Комплексное исследование сырья необходимо для обоснования состава и функциональных свойств рецептуры быстрорастворимых киселей. Изучена также пищевая ценность клубней топинамбура в виде порошкообразного полуфабриката. Полученные материалы свидетельствуют, что пищевые характеристики исследуемого объекта по сравнению со свежим топинамбуром (его клубнями) выше примерно в 4 раза. Процентный состав отдельных элементов можно увидеть в таблице 8,8.

Таблица 8.8 - Химический состав порошка из топинамбура

Показатель	Порошок из топинамбура
Влаги, %	8,4 \pm 0,55
Органические кислоты, %	0,4 \pm 0,01
Сахара, %	61,6 \pm 5,4
Азотистые вещества, %	9,8 \pm 0,61
Липиды, %	0,68 \pm 0,06
Пектиновые вещества, %	12,9 \pm 0,74
Зола, %	2,2 \pm 0,38
Натрий, мг /100 г	11,5 \pm 0,84
Калий, мг/100 г	819,0 \pm 14,50
Кальций, мг /100 г	70,0 \pm 4,10
Магний, мг /100 г	42,0 \pm 2,9
Фосфор, мг /100 г	300,0 \pm 9,8
Витамин С, мг /100 г	89,0 \pm 4,5

Недостаток кислот, что характерно для топинамбура, компенсируется путем купажирования с концентрированными соками с высоким содержанием кислот

Химический состав плодово-ягодных концентрированных соков, полученный в результате проведенных исследований, приведен в таблице 8.9.

Таблица 8.9 - Химический состав плодово-ягодных концентрированных неосветленных, нестерилизованных соков

Показатель	Из лимонника	Облепиховый	Яблочный
Массовая доля растворимых сухих веществ, %	64,0±2,11	65,00±2,64	54,00±2,46
Массовая доля титруемых кислот в пересчете на яблочную, %	12,0±0,50	12,4±0,67	2,4±0,50
Массовая доля сахаров, %	49,0±3,45	49,6±3,11	48,4±2,41
Массовая доля золы, %	1,3±0,05	2,6±0,13	1,7±0,05
Массовая доля витамина С, мг/100 г	94,6±4,87	674,2±13,57	99,4±5,08

Полученные материалы свидетельствуют о возможности использования вышеуказанного сырья Кемеровской области в качестве дополнительного источника витаминов, минеральных веществ, других биологически активных соединений.

В ингредиентный состав быстрорастворимого киселя входит порошкообразный препарат, полученный из стевии – вещества, не имеющего запаха, белого, кристаллической структуры. При сравнении с сахарозой имеет 180 единиц коэффициента сладости. Легко растворяется в спирте, воде и в продуктах на их основе. Основными свойствами порошка из стевии является: сочетаемость с органическими кислотами и растительными экстрактами; ингибирование процесса брожения, что обеспечивает продление сроков реализации; стабилизирующее влияние на содержание сухих веществ в растворах и готовой продукции; устойчивость к свету, сохранение сладости при хранении.

Изучен химический состав порошкообразной стевии (таблица 8.10).

Установлено, что в исследуемом объекте концентрация сухих веществ находится, в среднем, на уровне 92 %. Значительную часть сухих веществ составляют сахара – 79,0 и органические кислоты – 10,9%. На более незначительном уровне обнаружены минеральные вещества и биофлавоноиды, обладающие антиоксидантными свойствами (1,8%).

Таблица 8.10 - Химический состав стевии

Показатель	Порошок из стевии
Влаги, %	8,0±0,11
Органические кислоты, %	11,0±0,28
Сахара, %	78,8±2,74
Зола, %	0,24±0,01
Натрий, мг /100 г	4,57±0,23
Калий, мг/100 г	0,24±0,01
Кальций, мг /100 г	3,82±0,3
Магний, мг /100 г	0,24±0,02
Фосфор, мг /100 г	0,20±0,01
Биофлавоноиды (в пересчете на рутин), %	1,8±0,50

Органолептические достоинства продукта обусловлены обоснованием ингредиентного состава, в котором гармонично сочетаются консистенция, вкус, цвет и аромат. Результаты исследования модельных образцов быстрорастворимых киселей с различным качественным и количественным рецептурным составом компонентов служили основанием для выбора оптимального количественного ингредиентов. Подготовка модельных растворов осуществлялась по общепринятой методике. Основной приоритет уделялся количественному соотношению стевии, крахмала, фруктозы, овсяной муки и плодово-ягодным сокам.

Учитывая участие овсяной муки и крахмала в формировании вязкой и однородной консистенции киселя, проводили подбор рационального соотношения указанных ингредиентов. В таблицах 8.11 и 8.12 дана оценка модельного раствора быстрорастворимого киселя на основании органолептических показателей.

Полученные материалы позволяют заключить, что наиболее приемлемой органолептической характеристикой обладает вариант 1:5.

На рисунке 8.2 представлена динамика изменений реологических кривых, фиксируемых в процессе течения испытуемой смеси овсяной муки и крахмала.

Полученные материалы свидетельствуют, при соотношении 1:5 наблюдается повышение эффективности вязкости в условиях одинаковых температур восстановления напитка.

Таблица 8.11 - Сравнительная органолептическая оценка ФБК с различным соотношением структурообразующих компонентов

Соотношение компонентов крахмал : овсяная мука				
1:1	1:2	1:3	1:4	1:5
Консистенция густая. Крахмал не растворяется. Ощущается привкус крахмала	Ощущается частички крахмала. Неприятная вязкая консистенция	Ощущается крахмалистость во рту. Консистенция - вязкая	Консистенция киселеобразная. Остается слабый привкус крахмала	Консистенция киселеобразная. Вкус приятный

Таблица 8.12 - Балльная органолептическая оценка ФБК с различным соотношением структурообразующих компонентов

Наименование показателя	Соотношение компонентов крахмал : овсяная мука				
	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5
Внешний вид, цвет (max 7 – min 1)	1,6±0,5	3,5±0,5	4,5±0,5	5,3±0,5	6,4±0,5
Аромат и вкус (max 12 – min 6)	6,1±0,3	7,0±0,8	10,0±0,8	10,6±0,5	11,6±0,5
Комплексная оценка (max 19 – min 7)	7,7±0,6 (неудовл.)	10,5±0,9 (удовл.)	14,5±0,8 (хорошо)	15,9±0,5 (хорошо)	18,0±0,7 (отлично)

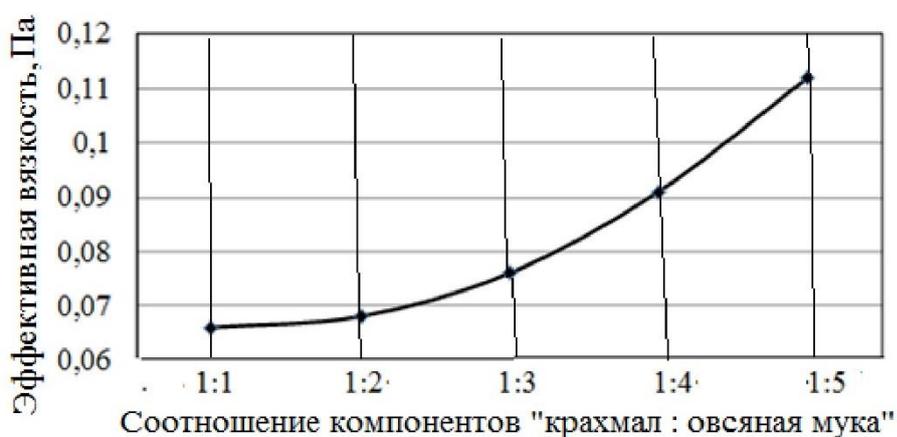


Рисунок 8.2 - Эффективная вязкость киселя при различных соотношениях крахмал : овсяная мука

Увеличение доли овсяной муки в рецептуре обеспечивает необходимую консистенцию и вкусовые характеристики функционального продукта.

Проведены исследования по подбору оптимального соотношения плодово-ягодных соков, поскольку они формируют вкусовые достоинства напитка и обеспечивают его пищевую ценность. Сок лимонника, как таковой, обладает высокой кислотностью и, поэтому, не пользуется спросом в чистом виде. Отсюда его использование для производства продукта с высокими органолептическими свойствами и содержанием макро-, микронутриентов (минералов, витаминов, других биологически активных веществ) может быть целесообразным только при добавлении низкокислотных соков – облепихового или яблочного.

Проведены исследования вкусового порога на образцах с различным количественным соотношением концентрированных соков – лимонного, облепихового и яблочного. Испытуемую смесь при $18 \pm 2^\circ\text{C}$ разбавляют водой и дают органолептическую оценку модельных образцов киселя (по балльной системе) (таблицы 8.13 и 8.14).

Таблица 8.13 - Сравнительная органолептическая оценка ФБК с композицией соков

Соотношение плодово-ягодных соков (яблочный : лимонниковый : облепиховый)			
1:1:1	1:1:2	2:1:3	2:1:4
Ярко–кислый вкус, горькое послевкусие. Ощущается только вкус лимонника	Вкус–кислый. Горькое послевкусие. Слабо ощущается облепиха	Ощущается присутствие облепихи и яблока. Во рту послевкусие, кислое	Вкус нежно–кислый, приятное кислое послевкусие

Органолептическая характеристика испытуемых вариантов позволило заключить, что четвертый вариант является наилучшим.

Эти образцы быстрорастворимого киселя характеризуются хорошими потребительскими свойствами: нежно-кислый вкус с наличием легкого освежающего послевкусия, приятный аромат, привлекательный цвет и внешний вид. Данное соотношение получило относительно высокую комплексную оценку –

в среднем 18,5 баллов и рекомендовано для использования в рецептуре функционального быстрорастворимого киселя.

Таблица 8.14 - Балльная органолептическая оценка ФБК с композицией плодово-ягодных соков

Наименование показателя	Соотношение плодово-ягодных соков (яблочный : лимонниковый : облепиховый)			
	1:1:1	1:1:2	2:1:3	2:1:4
Внешний вид, цвет (max 7 – min 1)	5,2±0,4	5,4±0,5	5,6±0,5	6,9±0,3
Аромат и вкус (max 12 – min 6)	8,0±0,9	8,8±0,4	10,2±0,6	11,6±0,5
Комплексная оценка (max 19 – min 7)	13,2±1,1 (удовл.)	14,2±0,6 (хорошо)	15,8±0,4 (хорошо)	18,5±0,7 (отлично)

Важное значение имеет подбор оптимального соотношения в рецептуре фруктозы и стевии. Это связано с тенденцией к замене высококалорийных углеводов натуральными сахарозаменителями с учетом изменения структуры рациона современного человека. Эти продукты необходимы в питании лиц с различными патологическими изменениями в углеводном обмене. Одними из перспективных сахарозаменителей в производстве напитков могут быть стевия и фруктоза. Они значительно превышают коэффициент сладости сахарозы, поэтому стоит вопрос подбора их рационального соотношения в рецептуре разрабатываемого напитка. В таблицах 8.15 и 8.16 показаны результаты проведенных исследований.

Таблица 8.15 - Сравнительная органолептическая оценка ФБК с компонентами стевия : фруктоза

Соотношение компонентов стевия : фруктоза					
1:1	1:10	1:50	1:70	1:80	1:100
Горький вкус стевии, металлическое послевкусие. Фруктоза не ощущается	Фруктоза не ощущается, горький вкус стевии. Послевкусие, горечь	Ощущается присутствие фруктозы, горькое послевкусие	Ощущается слабая горечь стевии	Имеется слабая горечь	Вкус сладкий, послевкусия и горечи нет

Таблица 8.16 - Балльная органолептическая оценка ФБК с различным соотношением компонентов стевия : фруктоза

Наименование показателя	Соотношение компонентов стевия : фруктоза					
	1:1	1:10	1:50	1:70	1:80	1:100
Внешний вид, цвет (max 7 – min 1)	6,1±0,3	6,2±0,4	6,2±0,4	6,3±0,5	6,3±0,5	6,4±0,5
Аромат и вкус (max 12 – min 6)	2,0±0,00	6,5±0,5	7,4±0,7	7,4±0,7	9,2±0,4	11,3±0,5
Комплексная оценка (max 19 – min 7)	12,1±0,3 (удовл.)	12,7±0,8 (удовл.)	13,6±0,6 (удовл.)	13,6±0,6 (хорошо)	15,5±0,5 (хорошо)	17,7±0,6 (отл.)

Наилучшим по органолептическим показателям является образец с соотношением фруктоза и стевия 100:1, для которого характерны гармоничные вкус и запах, привлекательный цвет и внешний вид и отсутствие горького послевкусия. Балльная оценка испытуемого образца относительно высокая и составляет, в среднем, 17,8 балла. Это еще раз подтвердило правильность выбранного соотношения стевии и фруктозы. В случае снижения содержания фруктозы регистрируется горький вкус с последующим металлическим послевкусием

8.2.2 Разработка технологии производства функциональных быстрорастворимых киселей

Предложена технология производства функциональных быстрорастворимых киселей (ФБК) – с использованием тарельчатого гранулятора и метода окатывания. На рисунке 8.3 дана технологическая схема.

В рецептуру киселя включен премикс витаминный, разработанный для пищевого концентрата промышленности. В состав премикса входит 10 витаминов, которые, по биохимическим и фармакологическим свойствам, своей чистоте и эффективности идентичны природным и отвечают требованиям нормативных документов. Разработана система, направленная на обеспечение стабильности

качественных характеристик и безопасности функционального напитка. Система представляет собой перечень контролируемых технологических параметров и контрольных точек.

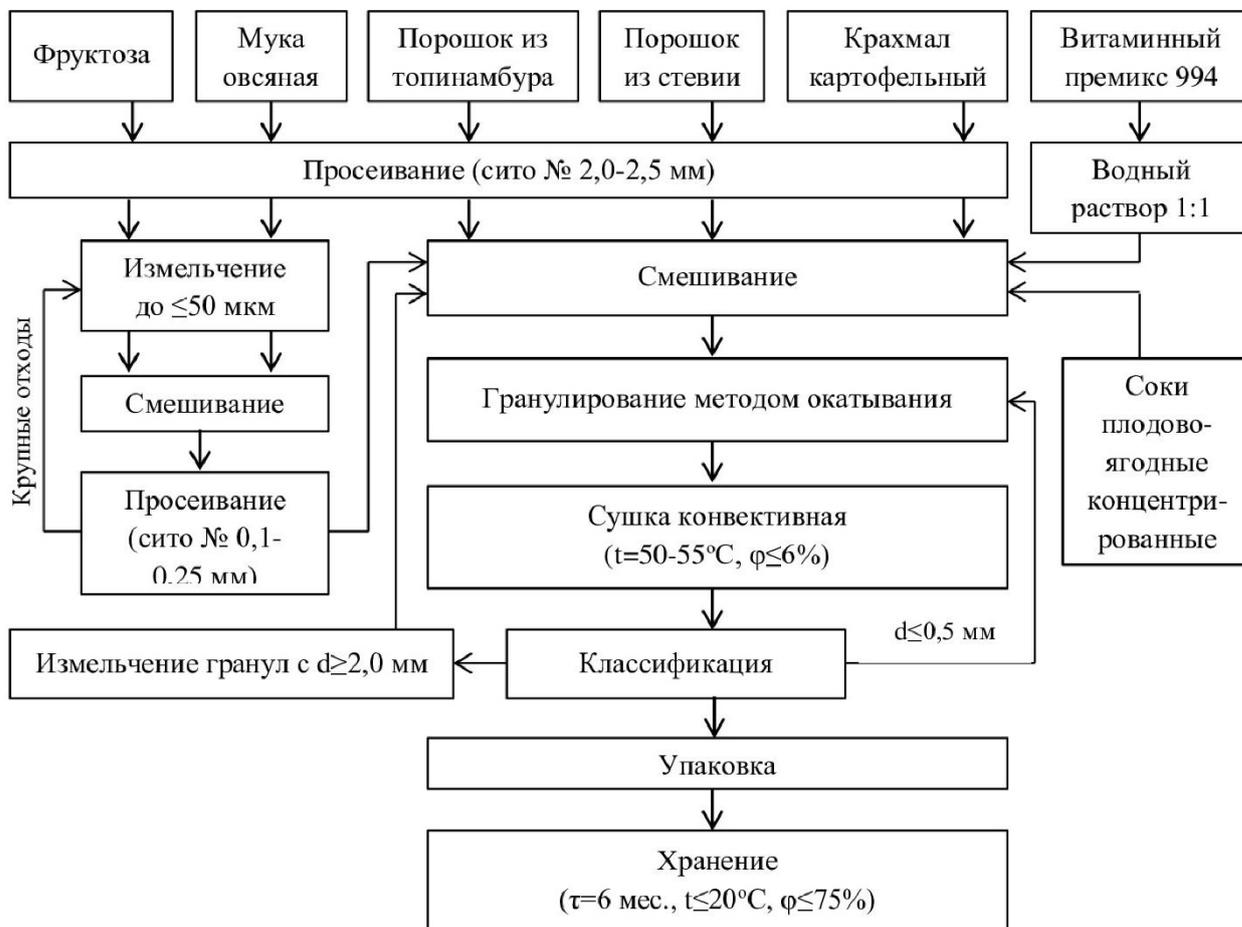


Рисунок 8.3 – Технологическая схема производства ФБК

Изучали физико-механические свойства киселя с целью подтверждения заданных технологических режимов производства.

Увеличение размера гранул, как показали проведенные исследования, способствует увеличению так называемой насыпной плотности киселя (в пределах $650\text{--}870\text{ кг/м}^3$), что несомненно уменьшает слёживаемость продукта и увеличивает срок хранения без потери вкусовых качеств.

На начальном этапе сушки происходит незначительное снижение прочности гранул вследствие плавления и дальнейшей кристаллизации фруктозы. Увеличение влагосодержания гранулы (до $11\pm 1\%$) приводит к повышению коэффициентов внутреннего и внешнего трения. Плотность гранул представляет симметричный

одновершинный вид ($d=1,5$ мм), что определяет подчиненность фракционного состава гранулята закону нормального распределения.

Результаты проведенных испытаний явились основанием целесообразности заданных режимов и параметров производства быстрорастворимых киселей. Это, в свою очередь, обеспечивает стабильность биологически активных ингредиентов.

В качестве основы определения технологических свойств пищевого концентрата был изучен процесс его восстановления. При этом были исследованы зависимости качественных зависимостей киселей от температурных режимов восстановления.

Предварительные испытания послужили основанием для установления температурных диапазонов при восстановлении быстрорастворимого киселя, при которых осуществлялось изучение вязкости. Восстановленные при заданной температуре напитки охлаждались до и при 20°C проводились исследования, результаты которых даны на рисунках 8.4 и 8.5.

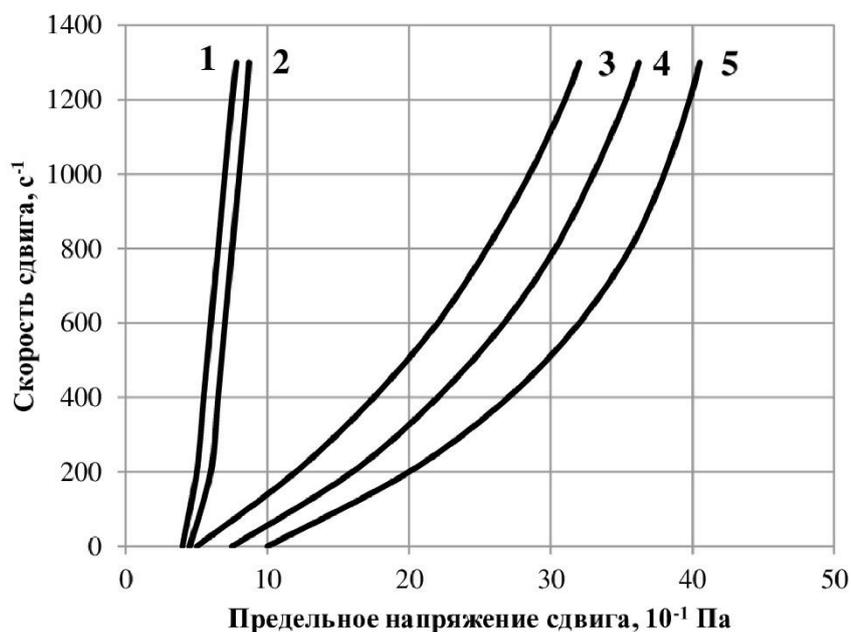


Рисунок 8.4 - Кривые течения ФБК:

(1 - 50°C ; 2 - 60°C ; 3 - 70°C ; 4 - 80°C ; 5 - 90°C)

Показатели предельного напряжения сдвига при температурах 20 – 60°C характеризуются линейной зависимостью, о чем свидетельствует анализ кривых течения. При температуре свыше 60°C наблюдается повышение показателей

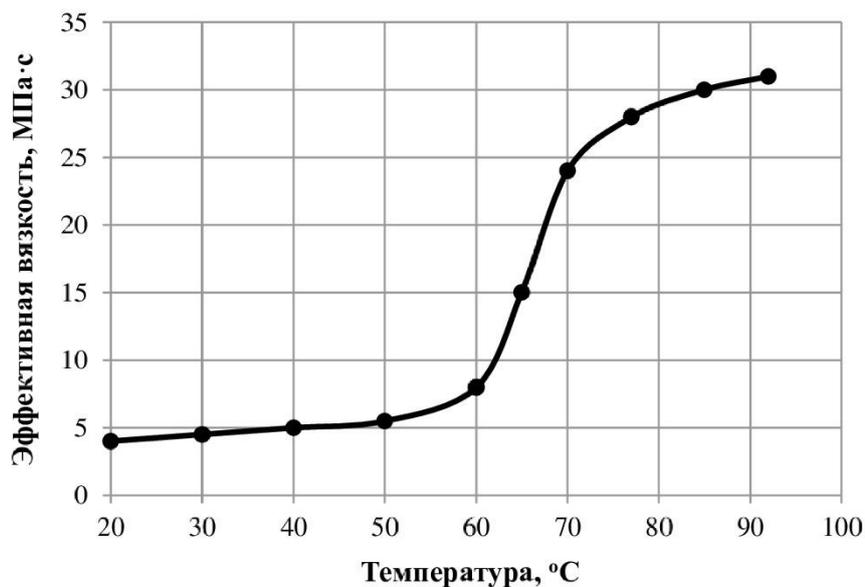


Рисунок 8.5 - Зависимость минимальной эффективной вязкости ФБК от температуры разведения

При разведении киселей в условиях температурных режимов 80–90°C отмечается оптимальная структурная организация с большим показателем вязкости при сравнении с исследованиями при температуре $60\pm 10^\circ\text{C}$. Восстановление сухого пищевого концентрата при температуре 90°C с последующей стабилизацией консистенции на протяжении 10 минут и охлаждением до 20°C приводит к двукратному повышению вязкости специализированного продукта через сутки – в 2,5 раза при сравнении с исходными данными.

Результаты выполненной работы дают основание для определения оптимальных температурных режимов восстановления пищевого концентрата с сохранением положительных структурно-механических свойств при испытанной температуре. Целесообразно было сохранить первоначальные температурные режимы изготовления киселя на уровне $97,5\pm 2,5^\circ\text{C}$ с учетом, что в процессе гидратации сухого продукта происходит определенная потеря тепла. При указанных температурах наблюдается полное растворение сухих ингредиентов, способствующее образованию наиболее вязкой структуры.

Определены регламентируемые органолептические характеристики сухого и восстановленного киселя (таблица 8.17), а также физико-химические показатели качества (таблица 8.18), калорийность и пищевая ценность продукта (таблица 8.19).

Таблица 8.17 - Регламентируемые органолептические показатели качества ФБК

Показатель	Характеристика
Гранулы	
Внешний вид, цвет	Однородная сыпучая масса с частицами в виде гранул размером от 0,5 до 2,0 мм. Гранулы компактные, плотные, округлой формы с матовой поверхностью, однородно окрашенные в желтый насыщенный цвет. Допускаются неплотно слежавшиеся комочки
Аромат	Соответствующий облепихе и овсяной муке, без посторонних оттенков
<i>Готовый к употреблению по способу, указанному на этикетке</i>	
Внешний вид, цвет	Однородная, вязкая масса без комочков, нежно-желтого цвета, опалесцирующая. Не допускается расслоение продукта, допустимы белые вкрапления, включения овсяной муки и плодово-ягодной мякоти
Аромат и вкус	Кисло-сладкие, свойственные облепихе и овсяной муке. Посторонние тона не допускаются

Из данных таблицы 8.19 следует, что 1 стакан киселя (200 см³) гарантирует суточную потребность в незаменимых пищевых веществах на уровне 2/3–1/3 от установленной нормы. Условия приготовления напитка: 3 чайные ложки – 25 г сухого напитка гидратируются водой при 95±5°С в количестве 200 см³, после чего продукт становится готовым к употреблению.

К преимуществам разработанного киселя относятся:

- удобство гранулированной формы в хранении, приготовлении и использовании;
- свойственные для потребителя органолептические характеристики – приятные запах, вкус и цвет;

Таблица 8.18 - Регламентируемые физико-химические показатели качества

Показатель	Значение
Массовая доля влаги, %, не более	6,0
Массовая доля титруемых кислот (в пересчете на лимонную кислоту), %, не более	0,7
Время растворения, сек., не более	20,0
Гранулометрический состав, %:	
- остаток на сите 0,5 мм, не более	98
- остаток на сите 2,0 мм, не более	0,5
Сыпучесть, г/сек., не менее	8,5
Массовая доля металлических примесей, %, не более	$3 \cdot 10^4$
Массовая доля посторонних минеральных примесей, %, не более	$1 \cdot 10^{-2}$
Посторонние примеси (кроме металлических и минеральных), а также зараженность вредителями	Не допускаются
Массовая доля витамина С, мг/ 25 г, не менее	30

Таблица 8.19 - Регламентируемая пищевая ценность гранулированного быстрорастворимого напитка (1 порция – 25 г)

Показатель	Значение
Углеводы, г	1,91
Белки, г	0,19
Жиры, г	0,08
Органические кислоты, г	0,06
витамин С, мг, не менее	30,00 (33,3)
витамин Е, мг, не менее	5,00 (33,3)
витамин В ₁ , мг, не менее	0,7 (46,7)
витамин В ₂ , мг, не менее	0,85 (47,2)
витамин В ₆ , мг, не менее	1,0 (50)
Витамин В ₁₂ , мкг, не менее	5,0 (166,7)
Фолиевая кислота, мкг, не менее	100,0 (25,0)
Пантотеновая кислота, мг, не менее	3,0 (60,0)
Ниацин, мг, не менее	9,0 (45,0)
Биотин, мкг, не менее	75,0 (150,0)
Энергетическая ценность, ккал	9,31

* В скобках % от суточной потребности для взрослых

– стандартизированные параметры, характеризующие качество и безопасность специализированного продукта, быстрота и надежность контроля функциональных ингредиентов и их действующих начал;

– возможность длительного хранения с сохранением безопасности и пищевой ценности.

Материалы проведенных исследований положены в основу разработки и утверждения технической документации на производство быстрорастворимых гранулированных киселей:

– «Кисели плодово-ягодные быстрорастворимые, гранулированные». Технические условия (с изменениями и дополнениями) ТУ 9195-001-16362254-19 (приложение Д).

– «Технологическая инструкция по производству киселей плодово-ягодных быстрорастворимых, гранулированных» (приложение Е).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

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 формируемых масс при гранулировании предопределяются дисперсным составом и количественным соотношением сравнительно грубодисперсного 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 характеристик, 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 – 45^0 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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон. Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
2. Аксельруд, Г. А. Введение в капиллярно-химическую технологию / Г. А. Аксельруд, М. А. Альтшулер. – М.: Химия, 1983. – 264 с.
3. Алексеев, А. А. Теория управления / А. А. Алексеев, Д. Х. Имаев, Н. Н. Кузмин, В. Б. Яковлев. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999. – 435 с.
4. Алесковский, В. Б. Физико-химические методы анализа. Практическое руководство / В. Б. Алесковский, В. В. Бардин. – Л.: Химия, 1988. – 377 с.
5. Андропова, О. И. Способ производства быстрорастворимого порошка для приготовления напитка / О. И. Андропова, Г. И. Касьянов, С. Д. Малышев, А. Я. Ицханович, О. И. Квасенков.: Пат. 2064280 Россия, МКИ⁶ А 23 L 2/39 /; АОЗТ Саби. – № 94037572/13.; Заявл. 5.10.1994; Оpubл. 27.07.1996. БИ. № 21.
6. Арбатская, Н. И. Способ получения молочной сыворотки в гранулах / Н. И. Арбатская, А. Н. Конвай, Н. А. Кузин, В. Н. Крамаренко, Н. Я. Якубович / А.с. 1336285 Мкл. А 23 С 21/00. – Оpubл. 28.12.84. БИ № 22.
7. Ахмадиев, Ф. Г. Моделирование и реализация способов приготовления смесей / Ф. Г. Ахмадиев, А. А. Александровский // Сб. науч. трудов, КИСИ, 1989. – С.448–453.
8. Ахназарова, С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М.: Химия, 1978. – 342 с.
9. Андроников, О. В. Некоторые особенности процесса грануляции порошкообразных материалов в аппаратах с вращающимися рабочими органами. / О. В. Андроников, П. В. Гордиенко, Б. Н. Процышин // Пром. теплотехн. –1995. –17. - № 1-3. – С. 51–53.
10. Баруча-Рид, А. Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения./ А. Т. Баруча-Рид. – М.: Наука, 1969. – 215 с.
11. Бердов, Г. И. Новые методы экспресс-анализа дисперсных систем./ Г. И. Бердов, В. Я. Толкачев. – Красноярск: Сибирь, 1992. – 161 с.

12. Блюмин, С. Л. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности / С. Л. Блюмин, И. А. Шуйкова. – Липецк: ЛЭГИ, 2000. – 138 с.
13. Богатырёв, А. Н. Система научного и инженерного обеспечения пищевых и перерабатывающих отраслей АПК России./ А. Н. Богатырёв, В. А. Панфилов, В. И. Тужилкин. – М.: Пищевая промышленность. 1995. – 528 с.
14. Бомштейн, В. Е. Новая технология получения порошкообразных смесей для напитков./ В. Е. Бомштейн, А. Ю. Демьянюк, В. Н. Малиновский, Г. Л. Филонова, А. Б. Щербаков. // Пиво и напитки. - 2002.- № 3. – С. 38–39.
15. Борисов, А. Н. Принятие решений на основе нечетких моделей / А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.
16. Буклагин, Д. С. Научно-методические основы оценки технического уровня сельскохозяйственной техники на базе системного анализа информации: автореф. дис... д-ра техн. наук / Д. С. Буклагин. – М.: НИИ информации и техн.-эконом. исслед. ПО Информагротех. 1997.
17. Бутковский, А. Г. Фазовые портреты управляемых динамических систем. Теоретические основы технической кибернетики / А.Г. Бутковский. М.: Наука. - 1985. 136 с.
18. Буянова, И.В. Обоснование использования ягодных экстрактов в кисломолочных напитках /И. В. Буянова, Е.М. Чмаро // Сб. науч. работ «Новые технологии и продукты». – Кемерово, 1998. – С. 37–39.
19. Вада, М. Модель вискокапиллярной связи зерен в грануле / М. Вада, О. Цучия // Материалы IX международного конгресса по обогащению полезных ископаемых: Прага, 1970. – С. 22–53.
20. Васильева, Р. А. Способ приготовления напитков из молочной сыворотки// Патент 2099985// № 95120985/13; Заявл.05.12.1995; Оpubл. 27.12.97.; опубл. БИ. № 19.
21. Васильева, Р. А. Напитки из творожной сыворотки / Р. А. Васильева, Г. Б. Лев // Пищевая технология. - 1998. – № 2-3.- С. 17–27.
22. Ветрова, Н. Т. Разработка технологии и совершенствование процессов производства быстрорастворимого гранулированного завтрака на основе

- молочной сыворотки и экстракта аронии черноплодной: дис... канд. техн. наук: 05.18.04 / Надежда Толибджоновна Ветрова. – Кемерово, 2007. – 113 с.
23. Вилесов, Н. Г. Процессы гранулирования в промышленности / Н. Г. Вилесов, В. Ч. Скрипко, О. Л. Ломазов, И. М. Панченко. – Киев: Техника, 1976. –192 с.
24. Витюгин, В. М. Исследование процесса гранулирования скатыванием с учетом свойств комкуемых дисперсий: дис... д-ра. техн. наук: 05.17.08. / Виктор Моисеевич Витюгин. – Томск, 1975. –312 с.
25. Витюгин, В. М. К теории окомкования влажных дисперсных материалов / В. М. Витюгин. – Томск: Известия ТПИ. – 1975. – Т. 272. – С. 127.
26. Витюгин, В. М. Графоаналитический метод определения наименьшей капиллярной влагоемкости дисперсных материалов./ В. М. Витюгин - Томск: Известия. – 1973. ТПИ - Т. 257. – С. 130.
27. Вода в пищевых продуктах / под ред. Р. Б. Дакуорта; пер. с английского. – М.: Пищевая промышленность, 1980. –376 с.
28. Воротникова, Т. С. Разработка технологии комбинированных напитков из молочной сыворотки: автореф. канд...техн. наук: 05.18.04 // Татьяна Сергеевна Воротникова. – М., 1995. –18 с.
29. Гаврилова, Н. Б. Биотехнологические основы производства комбинированных кисломолочных продуктов: автореф. дисс...д-ра техн. наук (05.18.04). / Наталья Борисовна Гаврилова. – Кемерово, 1996. – 39 с.
30. Гамаюнов, В. И. Исследование фазового состава переносимой влаги в процессе сушки пористых материалов / Пром. теплотехн. –1996. – 18, № 5. – С.. 88–94.
31. Герасименко, Е. О. Сухая смесь для приготовления напитка с лечебно-профилактическими свойствами / Е. О. Герасименко, Е. А. Бутина, Е. П. Корнева // Хранение и переработка сельхозсырья. - 1998. - № 3. – С. 7.
32. Герасимова, Т. В. Технология кисломолочных напитков: применение экстрактов растительного сырья / Т. В. Герасимова, И. А. Евдокимов, А. Д. Лодыгин, Е. А. Абакумова, Д. В. Харитонов // Молочная промышленность. - 2012. – № 2. – С. 83 – 84.

33. Георгиева, О. В. Разработка технологии сухих специализированных продуктов на молочной основе для коррекции питания беременных и кормящих женщин: автореф. канд...техн. наук (05.18.04). / Ольга Валентиновна Георгиева– М. – ВНИИМП. –1995. – 23 с.
34. Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов // СанПиН 2.3.2.560-96.
35. Гинзбург, А. С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности / А. С. Гинзбург – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.
36. Голуб, О. В. Исследование и разработка технологии продуктов на основе молочной сыворотки с использованием фитосырья: автореф. дисс... канд. техн. наук (05.18.04). / Ольга Валентиновна Голуб – Кемерово, 2000. – 16 с.
37. Горбатов, А. В. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов / А. В. Горбатов, Ю. А. Мачихин и др. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 296 с.
38. Горбатов, А. В. Реология мясных и молочных продуктов / А.В. Горбатов – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 384 с.
39. Горбатов, В. А. Логическое управление технологическими процессами / В. А. Горбатов, В. В. Кафаров, П. Г. Павлов – М. : Энергия, 1978. – 128 с.
40. Горенков, Э. С. Использование продуктов комплексной переработки молока в плодоовощной промышленности / Э. С. Горенков, О. Н. Квасенков, Л. Е. Посокина. – М.: Известия ВУЗов, 1997. – 58 с.
41. ГОСТ 3626 - 73. Методы определения влаги и сухого вещества.- М.: Стандартиформ,2009.- 22 с.
42. ГОСТ 8764 - 73. Метод определения титруемой кислотности молочной сыворотки.- М.: Стандартиформ, 2010.-5 с.
43. ГОСТ 12 788 - 87. Метод определения титруемой кислотности. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 1988. – 4 с.
44. ГОСТ 15133.4-77. Концентраты пищевые. Методы определения влаги. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 1978. – 10 с.

45. ГОСТ 15133.5-77. Концентраты пищевые. Методы определения кислотности. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 1978. – 8 с.
46. ГОСТ 15133.6-77. Концентраты пищевые. Методы определения сахарозы. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 1978. – 10 с.
47. ГОСТ 19215-73. Клюква свежая. Требования при заготовках, поставках и реализации // Плодовые и ягодные культуры. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – С. 221–226.
48. ГОСТ 20450-75. Брусника свежая. Требования при заготовках, поставках и реализации // Плодовые и ягодные культуры. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – С. 227–232.
49. ГОСТ 24027.2-80. Сырье лекарственное растительное. Методы определения влажности, содержания золы, экстрактивных и дубильных веществ, эфирных масел. - Введ. 1981-01-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1980. – 7 с.
50. ГОСТ 24556-89 (ИСО 6557-1-86, ИСО 6557-2-84). Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина С. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1989. – 9 с.
51. ГОСТ 25555.0-82. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения титруемой кислотности // Продукты переработки плодов и овощей. Методы анализа. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. – С. 54–57.
52. ГОСТ 25555.4-91. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения золы и щелочности общей и растворимой золы // Продукты переработки плодов и овощей. Методы анализа. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. – С. 71–74.
53. ГОСТ 25999-83. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витаминов В₁ и В₂ // Продукты переработки плодов и овощей. Методы анализа. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. – С. 81–88.
54. ГОСТ 26670-90. Продукты пищевые. Методы культивирования микроорганизмов. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1990. – 11 с.
55. ГОСТ 26927-86. Сырье и продукты пищевые. Метод определения ртути. – Введ. 1986-12-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1986. – 21 с.

56. ГОСТ 26928-86. Сырье и продукты пищевые. Метод определения железа. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1986. – 10 с.
57. ГОСТ 28561-90. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги // Продукты переработки плодов и овощей. Методы анализа. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. – С. 113–121.
58. ГОСТ 28562-90. Продукты переработки плодов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ // Продукты переработки плодов и овощей. Методы анализа. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. – С. 122–131.
59. ГОСТ 29030-91. Продукты переработки плодов и овощей. Пикнометрический метод определения относительно плотности и содержания растворимых сухих веществ. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1991.
60. ГОСТ 29059-91. Продукты переработки плодов и овощей. Титриметрический метод определения пектиновых веществ.–М.: ИПК Изд-во стандартов, 1991. –10 с.
61. ГОСТ 6687.5-86. Продукция безалкогольной промышленности. Методы определения органолептических показателей и объема продукции. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1986. – 7 с.
62. ГОСТ 8756.11-78. Продукты переработки плодов и овощей. Метод определения пектиновых веществ. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1978. – 15 с.
63. ГОСТ 8756.13-87. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сахаров // Продукты переработки плодов и овощей. Методы анализа. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. – С. 30–38.
64. ГОСТ 8756.22-80. Продукты переработки плодов и овощей. Метод определения каротина // Продукты переработки плодов и овощей. Методы анализа. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. – С. 50–53.
65. ГОСТ Р 50474-93. Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечной палочки (колиформных бактерий). - Введ. 1994-01-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1994. – 10 с.
66. ГОСТ Р 50479-93. Продукты переработки плодов и овощей. Метод определения витамина РР. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1997. – 7 с.

67. ГОСТ Р 50480-93. Продукты пищевые. Метод выявления бактерий рода *Salmonella*. - Введ. 1994-01-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1994. – 15 с.
68. ГОСТ Р 51301-99. Продукты пищевые и продовольственное сырье. Инверсионно-вольтамперометрические методы определения содержания токсичных элементов (кадмия, свинца, меди и цинка). – Введ. 2000-07-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 25 с.
69. ГОСТ Р 51962-02. Продукты пищевые и продовольственное сырье. Инверсионно-вольтамперометрический метод определения массовой концентрации мышьяка. – М.: ИПК Изд-во стандартов.
70. Гранковский, И. Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах./ И. Г. Гранковский. – Киев: Наукова Думка, 1984. –300 с.
71. Грег, С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость./ С. Грег, К. Синг. Пер. с англ.- 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1984 –306 с.
72. Григорьянц, Р. Р. Установка для термообработки гранулированных продуктов / Р. Р. Григорьянц, В. Д. Коганов, И. Л. Мостинский // Пищевая промышленность. – 1999 – № 9. – С. 56–57.
73. Гуськов, К. П. Реология пищевых масс / К. П. Гуськов, Ю. А. Мачихин. – М.: Наука, 1965. –223 с.
74. Дворецкий, Г. В. Исследование смачиваемости порошкообразных продуктов с целью разработки одноступенчатого способа производства сухого цельного быстрорастворимого молока: автореф. дисс...канд. техн. наук (05.18.04). – М., 1972.
75. Дворянкин, А. М. Методы синтеза технических решений/ А. М. Дворянкин, А. И. Половинкин, А. Н. Соболев – М.: Наука, 1977. – 104 с.
76. Дерней, И. Производство быстрорастворимых продуктов /И. Дерней. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. –184 с.
77. Дерягин, Б. В. Определение удельной поверхности тел по скорости капиллярной пропитки / Б.В. Дерягин. // Коллоидный журнал. - 1946. – Т.8. - №1–2. - С. 27–30.
78. Дерягин, Б. В. Вода в дисперсных системах / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, Ф.Д.

Овчаренко. – М.: Химия, 1989. – 288 с.

79. Дерягин, Б. В. Адгезия твердых тел / Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, С. П. Смилга – М.: Наука, 1973. – 279 с.

80. Дилигенский, Н. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация / Н. В. Дилигенский, Л. Г. Дымова, Н. В. Севастьянов. – М.: Машиностроение, 2004. – 397 с.

81. Драпкина, Г. С. Разработка технологии сухой гранулированной сыворотки методом окатывания: дисс...канд. техн. наук: 05.18.04 / Галина Станиславовна Драпкина. – Кемерово, 2001. дисс...канд. техн. наук – 167 с.

82. Дунченко, Н. И. Научное обоснование технологий производства и принципов управления качеством структурированных молочных продуктов: дисс... д-ра техн. наук: 05.18.04 / Нина Ивановна Дунченко. – Кемерово, 2003. – 407 с.

83. Дульнев, Г. Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

84. Евдокимов, И. А. Рациональная переработка молочной сыворотки / И. А. Евдокимов, В. В. Костина, С. А. Рябцева, В. Г. Папин. // Молочная промышленность. – 1996. – № 4. – С. 11–16.

85. Евдокимов, И. А., Вторичное молочное сырье в производстве функциональных продуктов // И. А. Евдокимов, И. К. Куликова, А. Р. Агирбова, А. В. Новосельская, А. А. Смирнов // Вестник СКФУ. - 2013. – №1 (34). - С. 116–119.

86. Енюков, И. С. Методы, алгоритмы, программы многомерного статистического анализа / И. С. Енюков.–М.: Финансы и статистика, 1986. – 298 с.

87. Жидков, В. Е. Развитие биотехнологических аспектов производства альтернативных вариантов тонизирующих напитков на основе молочного лактозосодержащего сырья: автореф. дисс... д-ра техн. наук: 05.18.04 / Владимир Евдокимович Жидков. – М., 2001. – 50 с.

88. Жидков, В. Е. Научно-технические основы биотехнологии альтернативных вариантов напитков из молочной сыворотки/ В. Е. Жидков. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. – 153 с.

89. Жуковин, В. Е. Нечеткие многокритериальные модели принятия решений / В. Е. Жуковин. – Тбилиси: Мецниереба, 1988. – 72 с.
90. Заде, Л. А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений: пер. с англ. / Л. А. Заде. – М.: Знание, 1974. – 64 с.
91. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и её применение к понятию приближенных решений: пер. с англ. / Л. А. Заде. – М.: Мир, 1976 – 165 с.
92. Зимон, А. Д. Коллоидная химия / А. Д. Зимон, Н. Ф. Лещенко. – М.: Агар, 2001. – 318 с.
93. Зимон, А. Д. Адгезия пищевых масс / А. Д. Зимон. – М.: Агропромиздат, 1985. – 272 с.
94. Зимон, А. Д. Аутогезия сыпучих материалов / А. Д. Зимон, Е. И. Андрианов. – М.: Химия, 1978. – 260 с.
95. Иванов, П. П. Разработка технологии и аппаратурного оформления производства концентрированных плодово-ягодных экстрактов для молочной промышленности: дисс... канд. техн. наук: 05.18.04 / Павел Петрович Иванов.– Кемерово, 2002. – 134 с.
96. Иванова С. А. Критерии оценки качества формирования газожидкостных дисперсных систем молочного сырья / Иванова С. А. // Техника и технология пищевых производств. – 2011. – № 2. – С. 138–145.
97. Кавецкий, Г. Д. Процессы и аппараты пищевой технологии / Г. Д. Кавецкий, Б. Д. Васильев. – М.: Колос, 1999. – 551 с.
98. Каледина, М. В. Кисломолочный напиток с пищевыми волокнами / М. В. Каледина, И. А. Евдокимов, Н. П. Салаткова, О. В. Жигулина, М. И. Шрамко, А. Р. Федосова // Молочная промышленность. - 2013. – №8. – С. 43–44.
99. Карапетьянц, М. Х. Строение вещества / М. Х. Карапетьянц, С. И. Дракин. – М.: Высшая школа, 1978. – 304 с.
100. Капустин Н. М. Автоматизация конструкторского и технологического проектирования / Н. М. Капустин, Г. Н. Васильев. – М.: Высшая школа, 1986. – 192 с.

101. Кардашев, Г. А. Физические методы интенсификации процессов химических технологий / Г. А. Кардашев. – М.: Наука, 1990. – 208 с.
102. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971. – 784 с.
103. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
104. Касьянов, Г. И. Биотехнология получения и применения экстрактов и структурообразователей / Г. И. Касьянов, М. Ю. Тамова. – Краснодар: Экоинест, 2002. – 229 с.
105. Кафаров, В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.
106. Кафаров, В. В. Моделирование и системный анализ биохимических производств / В. В. Кафаров, А. Ю. Винаров, Л. С. Гордеев. – М.; Лесная промышленность, 1985. – 344 с.
107. Кафаров, В. В. Гибкие производственные системы в химической промышленности / В. В. Кафаров, В. В. Макаров. – М.: Химия, 1990. – 320 с.
108. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов./ В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов. – М.: Наука, 1985. – 440 с.
109. Классен, П. В. Гранулирование / П. В. Классен, И. Г. Гришаев, И. П. Шомин. – М.: Химия, 1991. – 240 с.
110. Киршер, О. Научные основы техники сушки. Пер. с нем. под ред. А.С.Гинзбурга / О. Киршнер. – М.: Инлитиздат, 1961. – 539 с.
111. Киселева, Т. Ф. Научное обоснование разработки напитков с социально значимыми свойствами и практические аспекты формирования их качества: дисс... д-ра техн. наук: 05.18.15 / Татьяна Федоровна Киселева. – Кемерово, 2006. – 385 с.
112. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

113. Коваленко, М. С., Переработка побочного молочного сырья / М. С. Коваленко. – М.: Пищевая промышленность, 1965. – 122 с.
114. Коган, Б. И. Научные предпосылки технологического обеспечения качества восстановления и повышения надёжности пищевых машин / Б. И. Коган, А. Л. Майтаков // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2008. – № 2(66). С. 79–82.
115. Козлов, С. Г. Методические и технологические аспекты создания структурированных продуктов из молочной сыворотки и растительного сырья: монография / С. Г. Козлов. – Кемерово: Кузбассвуиздат; М.: Российские университеты, 2005. – 168 с.
116. Кочетков, В. Н. Гранулирование минеральных удобрений / В. В. Кочетков. – М.: Химия, 1975. – 236 с.
117. Коршиков, Г. В. Гранулирование тонкодисперсных порошков / Г. В. Коршиков // Известия ВУЗов. Черная металлургия. - 1973. – №2. – С. 37–40.
118. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов./ П. А. Коузов. – Л.: Химия, 1987. – 264 с.
119. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств: пер. с франц. / А. Кофман. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
120. Кочеткова, А. А. Функциональные продукты в концепции функционального питания / А. А. Кочеткова // Пищевая промышленность. – 1995. – № 2. С. 9–15.
121. Кравченко, С. Н. Исследование ингибирующих свойств продуктов переработки плодово-ягодного сырья / С. Н. Кравченко, А. М. Попов, Н. Т. Ветрова // Известия вузов. Пищевая технология. – 2007. – № 4. – С. 59–61.
122. Кравченко, С. Н. Производство обогащенных продуктов с использованием экстрактов и их товароведная оценка / С. Н. Кравченко, С. С. Павлов. – М.: Российские университеты; Кемерово: Кузбассвуиздат, 2006. – 151 с.
123. Кравченко, С. Н. Разработка технологии и совершенствование аппаратного оформления производства пищевых продуктов обогащенных растительными экстрактами: дисс. ...канд. техн. наук: 05.18.04, 05.18.12 / Сергей Николаевич Кравченко. – Кемерово, 2002. – 138 с.

124. Кравченко, С. Н. Физиологическая ценность экстрактов, полученных из высушенных ягод и жома клюквы / С. Н. Кравченко, А. М. Попов, А. Н. Химич // Известия вузов. Пищевая технология. – 2009. – № 2–3. – С. 43–46.
125. Кравченко, Э. Ф. Состояние и перспективы использования молочной сыворотки // Сыроделие. - 2000.- № 2. – С. 28–29.
126. Кравченко, Э. Ф. Состояние и перспективы переработки и использования молочной сыворотки в СССР и за рубежом / Э. Ф. Кравченко, Т. А. Волкова, О. А. Чекалова. – М.: АгроНИИТЭИ Мясомолпром, 1989. –44 с.
127. Крашенинин, П. Ф. Молочная сыворотка и направления ее рационального использования / П. Ф. Крашенинин, Н. Н. Липатов, А. Г. Храмцов, В. Н. Сергеев. – М.: АгроНИИТЭИ Мясомолпром, 1992. – 40 с.
128. Крючков, Ю. Н. Геометрические модели структуры дисперсных материалов / Ю. Н. Крючков. – М.: Стекло и керамика. – 1997. – №8. – С. 21–23.
129. Круглицкий, Н. Н. Физико-химические основы регулирования свойств глинистых материалов / Н. Н. Круглицкий. – Киев: Наукова Думка, 1968. –320 с.
130. Крянев, А. В. Математические методы обработки неопределенных данных / А. В. Крянев, Г. В. Лукин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 216 с.
131. Кувшинников, И. М. Ещё раз о гигроскопичности солей и удобрений / И. М. Кувшинников, Т. А. Чарикова. – М.: Хим. Пром., 1992. – №11(683). – С. 51–55.
132. Кувшинников, И. М. Роль и поведение воды в процессе гранулирования простого и двойного суперфосфатов /И. М. Кувшинников, Л. Я. Тавровская, Н. Ю. Никифорова. – М.: Хим. Пром., 1994. – №5(308) – С. 32–37.
133. Липатов, Н. Н. Предпосылки компьютерного проектирования продуктов и рационов питания с задаваемой пищевой ценностью / Н. Н. Липатов. – М.: Хранение и переработка сельхозсырья. – 1995. – № 3. – С. 4–9.
134. Липатов, Н. Н. Проблемы производства сухого быстрорастворимого молока. /Н. Н. Липатов// Молочная промышленность. - 1970. – № 11. – С. 11–13.
135. Липатов, Н. Н. Прибор для определения относительной скорости растворения сухого молока / Н. Н. Липатов, В. Д. Харитонов // Молочная промышленность. - 1972. – № 11. – С. 7–10.

136. Липатов, Н. Н. (мл.), Методология проектирования продуктов питания с требуемым комплексом показателей пищевой ценности / Н. Н. Липатов (мл.), И. А. Рогов // Известия вузов. Пищевая технология. – 1987. – № 2. – С.9–15.
137. Лотов, В. А. Закономерности оптимального формирования структур в технологии материалов на основе силикатных дисперсных систем: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук (05.17.11). / Василий Агафонович Лотов. – Томск, 2002.
138. Лотов, В. А. Основы управления процессами структурообразования во влажных дисперсных системах / В. А. Лотов, В. В. Гурин, А. М. Попов. – Кемерово; М.: Издательское объединение «Российские университеты»: Кузбассвуиздат – АСТШ, 2006. – 295 с.
139. Лукин, Н.Д. Способ получения гранулированной молочной сыворотки / Н. Д. Лукин, Н. Г. Гулюк, Е. К. Сидорова, Ю. В. Космодемьянский.– А.с. СССР, 973098 Мкл.А 23 С 21/00. Опубл. 15.11.82 БИ № 42.
140. Лю, Б. Теория и практика неопределенного программирования: пер. с англ. / Б. Лю. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2005. – 416 с.
141. Майтаков, А. Л. Теоретические основы обеспечения качества функциональных элементов пищевых машин на основе формирования моделей технологических блоков: монография / А. Л. Майтаков. – Кемерово. Кузбассвуиздат. – 2010. – 139 с.
142. Майтаков, А. Л. Моделирование и многокритериальный синтез производства гранулированных пищевых концентратов: монография / А. Л. Майтаков. – Кемерово, 2017. – 224 с.
143. Майтаков, А. Л. Особенности технологии гранулирования полидисперсных смесей с молочной сывороткой: монография / А. Л. Майтаков. – Кемерово, 2020. – 123 с.
144. 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.

145. 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.
146. 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.
147. Майтаков, А. Л. Оценка эффективности комбинированной упрочняюще-отделочной обработки деталей пищевых машин // Известия ВУЗов. Пищевая технология. - 2008. - № 4. - С. 78–81.
148. 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.
149. 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.
150. 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.
151. Майтаков, А. Л. Выявление взаимосвязей показателей износостойкости деталей пищевых машин методом нейросетевого программирования / А.Л. Майтаков // Известия ВУЗов. Пищевая технология. - 2009. - № 2–3. - С. 81–84.
152. 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.
153. 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.

154. Майтаков, А. Л. Корреляционная оценка коррозионной стойкости рабочих модулей пищевых машин / А. Л. Майтаков, А. М. Осинцев, Л. Н. Берязева // Известия ВУЗов. Пищевая технология. - 2010. – № 1. – С. 82–84.

155. 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.

156. Майтаков, А. Л. Применение и оценка эффективности наноструктурных материалов для повышения надёжности рабочих элементов пищевых машин / А. Л. Майтаков, Б. И. Коган // Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 2009. – № 6 (76). – С. 84–85.

157. 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.

158. 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.

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

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

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

162. 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. – Т. 80. – № 4. – С. 63–68.
163. Майтаков, А. Л. Перспективы развития безотходных технологий продуктов на основе растительного сырья и молочной сыворотки / А. Л. Майтаков, А. А. Сарафанов // Техника и технология пищевых производств. - 2020. – № 2. – С. 261–272.
164. 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.
165. Майтаков, А. Л. Технология получения гранулированных быстрорастворимых киселей на основе молочной сыворотки и растительного сырья / А. Л. Майтаков, Л. Н. Берязева, Н. Т. Ветрова, К. Б. Плотников // Известия ВУЗов. Пищевая технология. - 2020. – № 2–3. – С. 38–41.
166. Майтаков, А. Л. Исследование процесса сушки с использованием фазовой диаграммы дисперсных систем / А.Л. Майтаков, А. М. Попов, Л. Н. Берязева // Продукты питания и рациональное использование сырьевых ресурсов. Сборник научных трудов.– Кемерово, 2007. – Выпуск 12. - С. 121–124.
167. Майтаков, А. Л. Пути повышения производительности гранулообразования в тарельчатых грануляторах / А. М. Майтаков, А. М. Попов, Л. Н. Берязева // Продукты питания и рациональное использование сырьевых ресурсов. Сборник научных трудов.– Кемерово, 2007. – Выпуск 12. - С. 82–84.
168. Майтаков, А. Л. Оптимизация процесса гранулообразования с помощью активатора / А. Л. Майтаков, А. М. Попов, Л. Н. Берязева // Продукты питания и рациональное использование сырьевых ресурсов. Сборник научных трудов.– Кемерово, 2007. – Выпуск 12. -С. 85–86.

169. Майтаков, А. Л. Основы формирования информационных моделей технологических блоков для обеспечения качества машин и аппаратов пищевых производств // А. Л. Майтаков, Б. И. Коган // Новые материалы и технологии в машиностроении: Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции.– Брянск, 2007 – Выпуск 7. - С. 91–95.
170. Майтаков, А. Л. О построении информационных моделей технологических блоков для обеспечения качества пищевых машин / А. Л. Майтаков, Б. И. Коган // Физика, химия и механика трибосистем. Сборник научных трудов. Изд-во «Ивановский государственный университет», 2007. – выпуск 6. - С. 31–36.
171. Майтаков, А. Л. Оптимизация информационных моделей технологических блоков при восстановлении деталей пищевых машин / А. Л. Майтаков, Б. И. Коган // Вестник Российской академии естественных наук (Западно-Сибирское отделение),– 2008. – выпуск 10.-С. 134–139.
172. Майтаков, А. Л. Построение модульной технологии формирования и восстановления функциональных поверхностей элементов пищевых машин на базе информационных моделей технологических блоков / А. Л. Майтаков, Б. И. Коган // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструментов и технологической оснастки: в 2 ч. Часть 1. Материалы 10-й Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург. Изд. Политехнического университета, 2008. – С. 248–253.
173. 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.
174. Майтаков, А. Л. Определение параметров качества деталей пищевых машин методом нейросетевого программирования / А. Л. Майтаков, Б. И. Коган // Вестник Российской академии естественных наук (Западно-Сибирское отделение), 2009. – выпуск 11.- С. 128–132.
175. Майтаков, А. Л. Использование моделей технологических блоков для обеспечения качества функциональных поверхностей пищевых машин // А. Л. Майтаков, Л. Н. Берязева, Н. Т. Ветрова // Труды Международной научно-

практической конференции «Чистая вода – 2009». 20 – 21 октября, Кемерово, 2009. – С. 399–403.

176. Майтаков, А. Л. О создании системы технологического обеспечения качества функциональных элементов пищевых машин / А. Л. Майтаков // Продукты питания и рациональное использование сырьевых ресурсов. Сборник научных трудов.– Кемерово, 2009. – Выпуск 20. - С. 132–134.

177. Майтаков, А. Л. Обеспечение качества деталей пищевых машин методом моделирования технологических блоков / А. Л. Майтаков // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Санкт-Петербург, 2009. – С. 305–308.

178. Майтаков, А. Л. Обеспечение качества деталей пищевых машин методом моделирования технологических блоков. / А. Л. Майтаков, Б. И. Коган // Материалы 8-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе». Новосибирск, 2010. – С. 72–74.

179. Майтаков, А. Л. Маркетинговые исследования рынка пищевых концентратов / А. Л. Майтаков, В. М. Позняковский, В. В. Бебенин // Материалы VIII международной научно–практической конференции «Ведущие научные новости-2012». Часть. 9 «экология». Прага. Издательство «Образование и наука», с. р. о., 2012. - С. 79-81.

180. Майтаков, А. Л. Товароведная характеристика быстрорастворимого гранулированного завтрака на основе местного растительного сырья / А. Л. Майтаков, В. М. Позняковский, Н. Т. Ветрова // Материалы VIII международной научно–практической конференции «Ведущие научные новости-2012». Часть. 9 «экология». Прага. Издательство «Образование и наука», с. р. о., 2012. – С. 75–79.

181. Майтаков, А. Л. Натурные испытания нового вида пищевого концентрата как доказательство эффективности и функциональной направленности его потребительских свойств / А. Л. Майтаков, В. В. Вековцев // Материалы VIII Международной научно–практической конференции «Восточное партнерство-

2012». Том 11 «Сельское Хозяйство». Промышленность. «Наука и исследования», 2012. – С. 40-43..

182. Майтаков, А. Л. Определение гранулометрического состава и пористости нового вида пищевого концентрата / А. Л. Майтаков, Л. Н. Берязева // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Восточное партнерство–2012». Том 11, «Сельское Хозяйств» Промышленность. «Наука и исследовании» 2012. – С. 49-51.

183. Майтаков, А. Л. Определение технологических параметров производства пищевого концентратного продукта на основе местного растительного сырья / А. Л. Майтаков, Н. Т. Ветрова, Л. Н. Берязева // Материалы VIII международной научно–практической конференции «Научные идеи-2012». Часть. 20 «экология». Прага. Издательство «Образование и наука», с. р. о., 2012. - С. 64-67.

184. Майтаков, А. Л. Изучение скорости увлажнения и растворения гранулированного киселя на основе аронии черноплодной и молочной сыворотки / А. Л. Майтаков, К. А. Литвина // Материалы VIII международной научно–практической конференции «Научные идеи-2012». Часть. 20 «экология». Прага. Издательство «Образование и наука», с. р. о., 2012. – С. 67–72.

185. Майтаков, А. Л. Исследование процесса концентрирования экстракта аронии черноплодной как фактора формирования качества продукта на его основе / А. Л. Майтаков, В. М. Позняковский, М. А. Босых, Ш. Т. Юсупов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии в пищевой промышленности и общественном питании». Екатеринбург, 2017. – С. 133–138.

186. Майтаков, А. Л. Обоснование технологических параметров производства и потребительские свойства новой формы специализированного напитка / А. Л. Майтаков, А. Ф. Шляпин, Н. В. Тихонова, В. М. Позняковский В. М. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». - 2017. – Т. 5. – №4. – С 41–50.

187. Майтаков, А. Л. Научное обоснование рецептурной формулы и регламентируемые показатели качества быстрорастворимого напитка на основе

местного сырья / А. Л. Майтаков, Е. А. Литвина, В. М. Позняковский // Научный журнал «АПК России». 2018. – Т. 25, –№ 1. – С. 121–126.

188. Майтаков, А. Л. Моделирование технологии гранулированных пористых систем и её использование в производстве комбинированных напитков / А. Л. Майтаков, Е. А. Литвина, В. М. Позняковский // Научный журнал «АПК России». 2017. – Т. 24, – № 5. – С. 1217–1222.

189. Майтаков, А. Л. Исследование процесса концентрирования быстрорастворимых гранулированных пищевых концентратов как фактора формирования качества продукта / А. Л. Майтаков, В. М. Позняковский, Н. Т. Ветрова, Л. Н. Берязева // Материалы XVI международной научно-практической конференции «Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований/ Т. 2. 30-31 июля 2018.. Северный Чарльстон, США. – С. 75-80.

190. Майтаков, А. Л. Научное обоснование рецептурной формулы и регламентируемых показателей качества быстрорастворимого напитка на основе местного сырья / А. Л. Майтаков, Н. Т. Ветрова, Л. Н. Берязева // Современные тенденции развития науки. Сборник тезисов национальной конференции. Кемерово, 2018. – С. 125–127.

191. Майтаков, А. Л. Моделирование технологических потоков производства многокомпонентных гранулированных пищевых концентратов с заданными параметрами качества / А. Л. Майтаков // Материалы IX международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». СПб. – Университет ИТМО, 2019. – С. 37–42.

192. Maytakov, A. L. Synergistic Synthesis of Multi-Range Food Technology Systems / A. L. Maytakov, A. M. Popov, E. G. Vinogray, N. T. Vetrova, L. N Beryazeva, K. B. Plotnikov. Advances in Social Science, Education and Humanities Research. Proceedings of the International Conference Communicative Strategies of Information Society (CSIS 2018). – 2019. – Vol. 9.–P. 238–241. – ISSN 2352-5398. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/csis-18/55913826>.

193. Майтаков, А. Л. Синергетический синтез технологий производства полидисперсных гранулированных продуктов / А. Л. Майтаков, Н. Т. Ветрова, Л.

- Н. Берязева // Холодильная техника и технологии. Сборник тезисов 1 национальной конференции. Кемерово, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет». – Кемерово, 2019. – С. 68–71.
194. Майтаков, А. Л. Синтез технологий производства полидисперсных технологий производства / А. Л. Майтаков, Н. Т. Ветрова, Л. Н. Берязева // Актуальные направления научных исследований: технологии, качество и безопасность / Сборник материалов Национальной (Всероссийской) конференции. ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет». – Кемерово, 2020. – С. 106–108.
195. Макаров, В. Н. Продукты питания функционального назначения на плодоовощной основе / В. Н. Макаров, Л. Н. Влазнева // Пищевая промышленность. – 2007. – № 1. – С. 20–21.
196. Максимов, В. И. Медицинский аспект пищевого крахмала / В. И. Максимов, В. Е. Родоман // Вопросы питания. – 1999. – № 1. – С. 46–48.
197. Маюрникова, Л.А. Разработка рациональной технологии порошкообразных смесей для напитков на основе местного растительного сырья: автореф. дисс. ... канд. техн. наук (05.18.04) / Лариса Александровна Маюрникова. – М., 1993. – 24 с.
198. Маюрникова, Л. А. Совершенствование технологического процесса и оборудования по производству порошкообразных смесей безалкогольных напитков/ Л. А. Маюрникова, В. М. Позняковский, В. А. Помозова, В. А. Поляков, Г. Л. Филонова // Вс. н.-тех. конф. Соверш. техн. процессов пр-ва новых видов пищ. продуктов и добавок. Использование втор. сырья пищ. ресурсов. Ч. 2. / Центр. правл. всес. НТО пищ. пр. – Киев, 1991. – С.191.
199. Махмудов, С. Экспериментально-технологическое исследование процесса гранулирования комбикормов методом окатывания: автореф. дисс. ... канд. техн. наук (05.00.00) / Саид Махмудов. – Л., 1968. – 22 с.
200. Могиленко, А. В. Теория нечетких множеств. Нечеткий регрессионный анализ / А. В. Могиленко. – Томск: Печатная мануфактура, 2004. – 61 с.
201. Москаленко, В. В. Системы автоматизированного управления

- электропривода./ В.В. Москаленко. – М.: Инфра-Инженерия, ISBN: 978-5-16-001676, 2008. – 208 с.
202. Назаров, В.И. Особенности процесса грануляции молока свертывающих ФП / В.И. Назаров, Д.А. Макаренков, Фам Ва Ау, А.В. Федотова, А.Н. Штыков // Сыроделие. – 2000 – № 1. – С. 11–13.
203. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д. А. Поспелова – М.: Наука, 1986 – 312 с.
204. Николаев, Б. А. Измерение структурно-механических свойств пищевых продуктов./ Б.А. Николаев. – М.: Экономика, 1964. – 224 с.
205. Норенков, И. П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. / И. П. Норенков – М.: Высшая школа, 1986. – 304 с.
206. Осипов, Л.А. Проектирование систем массового обслуживания./ Л. А. Осипов. – М.: Адвансед Солюшнз, 2011. – 112 с.
207. Остроумов, Л. А. Технологические свойства сухой гранулированной молочной сыворотки./ Л. А. Остроумов, А. М. Попов, В. В. Тихонов, Г. С. Драпкина. – М.: Сыроделие и маслоделие. –2001. – № 5. -С. 26 –27.
208. Остроумов, Л. А. Технологические свойства сухой гранулированной молочной сыворотки и их роль в обеспечении устойчивости продукта при хранении / Л. А. Остроумов, А. М. Попов, Г. С. Драпкина. // Материалы всероссийской научно-технической конференции «Пищевая промышленность 21 век», Тольятти – 2001. – С. 49–51.
209. Охорзин, В.А. Прикладная математика в системе MATHCAD./ В.А. Охорзин, – СПб.: Лань, ISBN: 978-5-8114-0814-6, 2008. – 352 с.
210. Майтаков, А.Л. Способ быстрого замораживания овощных полуфабрикатов [Текст] / И.А. Короткий, А.Л. Майтаков, Г.Ф. Сахабутдинова // Патент РФ № 2625982 ;№ 2016125508//Заявл.24.06.2016: опубл. 20.07.2017г.; опубл. в Б.И. № 20.
211. Майтаков, А.Л. Способ локального индукционного нагрева /А.М. Осинцев, А.Л. Майтаков, И.Л. Васильченко, В.М. Виноградов, В.В. Рынк // Патент РФ №

- 2497489//№2012122956; Заявл. 04.06.2012; опубл. 10.11. 2013г.; опубл. в Б.И. №31.
212. Павлова, В. В. Современные тенденции в производстве сухих поликомпонентных продуктов / В. В. Павлова, А. Г. Галстян, Ю. А. Бродский, Д. В. Харитонов // Сб. научн. тр. Сев.-Кавк. ГТУ. – Ставрополь, 2002. – С. 17–20.
213. Павлов, А. Н. Принятие решений в условиях нечеткой информации / Н. Павлов, Б. В. Соколов. – СПб, 2006. – 118 с.
214. Панфилов, В. А. Аграрно-пищевая технология: вопросы создания системного комплекса / В. А. Панфилов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2005. – № 8. – С. 8–14.
215. Панфилов, В. А. Диагностика технологий при разработке системы оборудования для производства сыров / В. А. Панфилов, Л. А. Остроумов, М. П. Щетинин // Хранение и переработка сельхозсырья. – 1997. – № 10. – С. 6–9.
216. Панфилов, В. А. Организация пищевых технологий будущего и фундаментальные изыскания настоящего / В. А. Панфилов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – № 12. – С. 6–9.
217. Панфилов, В. А. Систематизация теоретических основ пищевых технологий как необходимое условие их инновационного развития / В. А. Панфилов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – № 12. – С. 24–30.
218. Панфилов, В. А. Технологические линии пищевых производств. Теория технологического потока / В. А. Панфилов. – М.: Колос, 1993. – 288 с.
219. Панфилов, В. А. Технологические линии пищевых производств: создание технологического потока / В. А. Панфилов, О. А. Ураков. – М.: Пищевая промышленность, 1996. – 472 с.
220. Панфилов, В. А. Технологические линии пищевых производств; создание технологического потока / В. А. Панфилов, О. А. Ураков. – М.: Пищевая промышленность, 1996. – 472 с.
221. Перегудов, Ф. И. Введение в системный анализ / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – М: Высшая школа, 1989. – 367 с.
222. Патент 214774 РФ Кл. А 23 С 21/00, 1/00. Способ получения молочной

сыворотки в гранулах. – Оpubл.27.01.2000 БИ.№ 4.

223. Позняковский, В. М. Гигиенические основы питания и экспертиза продовольственных товаров / В. М. Позняковский. – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 1998. – 430 с.

224. Полак, А. Ф. Математическая модель структуры полидисперсной системы./ А. Ф. Полак, В. В. Бабков, Ю. Ф. Драган, В. Н. Мохов // В сб. Гидратация и твердение вяжущих материалов. – Уфа, 1978. – С. 3–11.

225. Полак, А. Ф. Описание геометрической структуры дисперсных систем./ А. Ф. Полак, В. В. Бабков, И. Ш. Фазулин, Р. Г. Хабибуллин // Труды НИИпромстроя.– М.: Стройиздат, 1976. – вып. 17, ч. II. - С. 5–20.

226. Рогов, И.А. Исследования в области совершенствования качества многокомпонентных комбинированных продуктов питания / И. А. Рогов, Н. Н. Липатов // Разработка продуктов питания: Тез. докл. НТК. – Кемерово, 1991. – Т.36. – С. 99–107.

227. Поляков, В. А. Производство концентратов для безалкогольных напитков с использованием пищевых добавок./ В. А. Поляков, Г. Л. Филонова, Р. А. Ермакова, Л. А. Маюрникова, В. М. Позняковский. - М.: ВАСХНИЛ, АгроНИИТЭИПП, Пищевая промышленность. Серия 22. – 1991. – Выпуск 11. – С. 31.

228. Попова, И. Д. Способ получения молочной сыворотки. в гранулах / И. Д. Попова, В. Ф. Суздальцев, П. В. Петрова, В. Д. Харитонов// Патент № 2144774 С1. – RU// №99104249/13; Заявл . 03.03.1999; опубл. 27.01.2000 –ВНИИИМП. – 2000. –6 с.

229. Помозова, В. А. Комбинированные продукты на основе молочного и растительного сырья / В. А. Помозова, А. М. Попов, Г. С. Драпкина, С. Г. Козлов // Достижения науки и техники АПК, 2002. – №1. – С. 34 – 35.

230. Попов, А. М. Научное обоснование и реализация технологических процессов производств сухих концентратов напитков с использованием молочной сыворотки: дисс. ... д-ра. техн. наук: 05.18.04 / Аанатолий Михайлович Попов. – Кемерово. – 359 с.

231. Попов, А. М. Общие принципы процесса гранулирования влажных дисперсных материалов методом окатывания / А. М. Попов, Г. С. Драпкина, С. А. Заболотских // Материалы международной научно-практической конференции «Пища, экология, качество». – Новосибирск: 2002. – С. 163–164.
232. Попов, А. М. Физико-химические основы технологий полидисперсных гранулированных продуктов питания / А. М. Попов. – Новосибирск: Сиб. Унив. изд-во, 2002. – 324 с.
233. Попов, А. М. Методика определения оптимальной формовочной влажности при гранулировании окатыванием растворимых дисперсных смесей / А. М. Попов // В сб. научных трудов «Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования и интенсификации технологических процессов пищевых производств». М. – МГУПБ. – 2002. – С. 335–339.
234. Попов, А. М. Изменение фазового состояния компонентов молочной сыворотки в процессе гранулирования / А. М. Попов, М. А. Постолова // Сб. научн. работ КемТИПП. – Кемерово, 2002. – Выпуск 4. – С. 43–44.
235. Попов, А. М. Применение гранулирования при производстве пищевых продуктов / А. М. Попов, С. А. Урбан // Сб. науч. трудов КемТИПП. – Кемерово, 2002. – Выпуск 4. – С. 97–98.
236. Попов, А. М. Математическая модель процесса гранулирования на аппарате тарельчатого типа / А. М. Попов, В. А. Павский // IV Международная объединённая научная конф. «Математическое моделирование физических, технических, социальных систем и процессов». Ульяновск. – 2001. – С. 123–124.
237. Попов А. М., Взаимодействие твёрдой и жидкой фаз при гранулировании плодово-ягодных киселей методом окатывания / А. М. Попов, Е. А. Литвина // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2002. – № 8. – С. 19–21.
238. Попов, А. М. Исследование влагопроводных свойств пищевых дисперсных масс / А. М. Попов, О. В. Балагура // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2003. – № 2. – С. 43–44.
239. Попов, А. М. Взаимосвязь фильтрационных и реологических свойств

- пищевых полидисперсных систем / А. М. Попов, Г. С. Драпкина // Хранение и переработка сельхозсырья. - 2003. - № 3. - С. 19-21.
240. Попов, А. М. Показатель формуемости пищевых дисперсных смесей / А.М. Попов // Хранение и переработка сельхозсырья. - 2003. - № 4 - С. 19-21.
241. Попов, А. М. Анализ и синтез технологий гранулированных концентратов напитков / А. М. Попов. - Кемерово, КемТИПП, - 2003. - 245 с.
242. Попов, А. М. Тарельчатый гранулятор с активатором / А. М. Попов, А. А. Попов, В. В. Тихонов, В. В. Гурин // Патент на изобретение №2209662 от 10.09.2003 г. По заявке № 2001123756/12(025316) от 28.08.2001.
243. Попов, А. М. Системные закономерности сложных объектов и принципы их использования при исследовании и проектировании технико-технологических комплексов / А. М. Попов, В. А. Панфилов // Хранение и переработка сельхозсырья. - 2005. - № 10. - С. 15-17.
244. Пospelов, Д. А. Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов / Д. А. Пospelов. - М.: Радио и связь. 1989. - 184 с.
245. Постолова, М. А. Разработка и исследование технологии быстрорастворимого гранулированного черничного киселя на основе молочной сыворотки: дисс. ...канд. техн. наук: 05.18.04 / Мария Анатольевна Постолова. - Кемерово, 2003. - 139 с.
246. Просеков, А. Ю. Теоретическое обоснование и технологические принципы формирования молочных пенообразных дисперсных систем: автореф. дис. ... д-ра техн. наук (05.18.04) / Александр Юрьевич Просеков. - Кемерово, 2004. - 42 с.
247. Радущкевич, Л. В. Попытки статистического описания пористых сред. - В кн.: Основные проблемы физической адсорбции / Л. В. Радущкевич. - М.: Наука, 1970. - 270 с.
248. Рамазанова, Л. А. Получение и использование комплексных БАД на основе молочной сыворотки / Л. А. Рамазанова, Т. Н. Даудова // Хранение и переработка сельхозсырья. - 2009. - № 2. - С. 63-65.
249. Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика дисперсных структур / П. А. Ребиндер. - М.: Наука, 1966. - 381 с.

250. Ребиндер, П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия / П. А. Ребиндер. – М.: Наука, 1978. – 368 с.
251. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Т.1 / А. А. Роде. – Л.: Гидрометеоздат. – 1965. – 664 с.
252. Ротштейн, А. П. Нечеткая надежность алгоритмических процессов / А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба. – Винница: Континент, 1997. – 142 с.
253. Руднев С. Д. Теоретические аспекты и методы исследований физико-механических свойств материалов биологического происхождения / С. Д. Руднев. – Кемерово, 2006. – 130 с.
254. Рыжов, А. П. Элементы теории нечетких множеств и ее приложений / А. П. Рыжов. – М.: Диалог МГУ, 1998. – 81 с.
255. Саати, Т. Аналитическое планирование. Организация систем / Т. Саати, К. Керис: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
256. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
257. Современные технологии хранения и переработки плодово-овощной продукции: научно-аналитический обзор. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. – 172 с.
258. Сенкевич, Т. Молочная сыворотка: переработка и использование в агропромышленном комплексе / Т. Сенкевич, К Ридель. – М., 1989. – 265 с.
259. Сегалова, Е. Е. Структурно-механические свойства смесей / Е. Е. Сегалова, П. А. Ребиндер, А. Н. Сентюрихина. – М.: Колл. ж. – 1951. – Т. 13. – №6. – 461с.
260. Сухоруков, А. В. Разработка технологии быстрорастворимого гранулированного напитка с использованием творожной сыворотки и растительного сырья: дисс. ...канд. техн. наук: 05.18.04 / Андрей Васильевич Сухоруков. – Улан-Удэ, 2009. – 108 с.
261. Табала, Е. Б. Обоснование использования дикорастущих ягод в производстве фруктово-ягодных кондитерских изделий: дисс. ... канд. техн. наук: 05.18.15 / Елена Борисовна Табала. – Новосибирск, 2007. – 124 с.
262. Таран, А. Л. Оценка условий, обеспечивающих гранулирование порошков

- окатыванием / А. Л. Таран // Хим. пром-ть. - 2000. - №3. - С. 169–172.
263. Технологическая инструкция по производству плодовых и ягодных соков. ТИ 10.244.001-90 / ВНПО консервной промышленности; ГК СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – М., 1993.
264. Тихонов, В. В. Разработка и исследование технологии гранулирования творожной сыворотки: дисс. ... канд. техн. наук: 05.18.04 / Виктор Владимирович Тихонов. – Кемерово, 2003. – 140 с.
265. Трухаев, Л. И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Л. И. Трухаев. – М.: Наука, 1981. – 258 с.
266. Тэрано, Т. Прикладные нечеткие системы: пер. с яп. / Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
267. Урьев, Н. Б. Высококонцентрированные дисперсные системы / Н. Б. Урьев. – М.: Химия, 1980. – 320 с.
268. Урьев, Н. Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов / Н. Б. Урьев. – М.: Химия, 1988. – 256 с.
269. Урьев, Н. Б. Пищевые дисперсные системы / Н. Б. Урьев, М. А. Талейсник. – М.: Агропромиздат, 1985 – 295 с.
270. Фадеева, В. С. Оптимальная влажность для формирования строительных изделий из пластичных дисперсных масс / В. С. Фадеева // Стекло и керамика. – 1959. – №8. – С. 33–39.
271. Харитонов, В. Д. Влияние физической структуры на свойства быстрой растворимости сухого молока / В. Д. Харитонов // Молочно-консервная промышленность. – 1974. – №4. – С. 13–16.
272. Химический состав российских пищевых продуктов: справочник / под ред. И. М. Скурихина, В. А. Тутельяна. – М.: ДеЛи принт, 2002. – 236 с.
273. Храмов А.Г. Феномен молочной сыворотки / А. Г. Храмов. – СПб.: Профессия, 2011. – 804 с.
274. Храмов, А. Г. Вторичные сырьевые ресурсы молочной промышленности и пути их рационального использования в условиях рыночной экономики / А. Г. Храмов // Известия вузов. Пищевая технология. – 1999. – № 5–6. – С. 14–17.

275. Храмцов, А. Г. Молочная сыворотка / А. Г. Храмцов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1990. – 240 с.
276. Храмцов, А. Г. Производство сгущенных концентратов молочной сыворотки: учеб. пособие / А. Г. Храмцов, П. Г. Нестеренко, Е. А. Чеботарев. – Ставрополь, 1998. – 80 с.
277. Храмцов, А. Г. Рациональная переработка и использование белковоуглеводного молочного сырья / А. Г. Храмцов, П. Г. Нестеренко. – М.: Молочная промышленность. – 1998. – 105 с.
278. Черемской, П. Г. Методы исследования пористости твердых тел / П. Г. Черемской. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
279. Шаталова, И. Г. Физико-химические основы уплотнения порошковых материалов / Е. Д. Шаталова, Н. С. Горбунов, В. И. Лихман. – М.: Наука, 1965. – 163 с.
280. Шаззо, Р. И. Функциональные продукты питания / Р. И. Шаззо, Г. И. Касьянов. – М.: Колос, 2000. – 248 с.
281. Шатнюк, Л. Н. Соки и напитки как источники витаминов в питании человека / В. Б. Спиричев // Вопросы питания. – 1999. – № 2. – С. 3–5.
282. Щетинин, М. П. Расчет целостности технологической системы производства сыра «Советский» / М. П. Щетинин // Хранение и переработка сельхозсырья, 1998. – № 12. – С. 25–26.
283. Щетинин, М. П. Разработка и совершенствование техники и технологии сыроделия на основе системного анализа и диагностики технологических потоков: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.18.04 / Михаил Павлович Щетинин. – Кемерово, 1999. – 276 с.
284. Экспертиза дикорастущих плодов, ягод и травянистых растений. Качество и безопасность: учеб.- справ. пособие для вузов / И. Э. Цапалова [и др.]; под общ. ред. В. М. Позняковского. – 3-е изд., исп. и доп. – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2005. – 216 с.
285. Abdel-Fabeel M. G. Production of instant soluble Roselle powder. «Alimenta», 1988, 27, № 3. – P. 60–61, 63,65 (англ).

286. Advanced dairy science and technology / T. J. Britz, R. K. Robinson (ed.). – Oxford: Blackwell Publishing, 2008. – 300 p.
287. Akuzava, R. Bioactive Components in Caseins, Caseinates, and Cheeses / R. Akuzava, T. Miura, H. Kawakami // Bioactive components in Milk and Dairy products / Park W. [ed.]. – Wiley–Blackwell, 2009. – P 217–233.
288. Kawase Hiroshi, Hasegawa Masayo, Sasaki Hitoshi, Miyamura Naohiro. Process for producing dry instant soups and sauces: Заявка 1075798 ЕПВ, МПК⁷ № 99917227.3; Заявл. 28.04.1999; Опубл. 14.02.2001; (Япония).
289. Arnaut Filip, Janke Hans – Christiar. Granulated bread improver for the preparation of bakery products. Заявка 0943242 ЕПВ, МПК⁶ А 21 Р 10/00, А 21 Д 2/00, А 21 Д 8/04 /; PURATOS N. V/ - № 98870039.9; Заявл. 26.02.1998; Опубл. 22.09.1999.
290. Baralle S. P., Borzani W. Use of yeas autolysate to improve batch lactic fermentation of whey by lactobactillus bulgaricus// Arg.biol e technol.,1988.-31.-№2. – P. 273–274.
291. Beaton G.H. Fortification of food for Refugee Feeding . Report to the Canadian International Development Agency, 1995.
292. Brownell W. E., Caso G. B., Braun D.B. An additive to increase plastic strength. //Amer. Ceram. Soc. Bull. -1978. - №5. v. 57. – P. 513–516.
293. Boland, M. «Designer» milks: functional foods from milk / M. Boland // Improving the safety and quality of milk / M.W. Griffiths [ed.]. – Cambridge: Woodhead Publishing limited. – 2010. – V.2. – P.74–96.
294. Capes C. E., Ind and End. Chem. Process and Developm, 1967, 6, 3. P. 390–392.
295. Capes C.E., Dauckwerts P.V., Frans Inst. Chem. Engrs, 43, 1965, –№4.- P.125–130.
296. Capes P. C., Fuerstenau D. W., Industr and Eng. Chem, 5, №1, 1965,–P.125–130.
297. Carman P. C. Flow of Gases through Porous Media. - London, 1956. – 182 p.
298. Cenkowski S.,Jayas D. ,Pabis S. Deep –bed grain drying, - A review if particuiar theories.// Drying Technol.- 1993.-11,№7. – P. 1553–1581.

299. Chemiluminescence of whole blood: I.A. simple and rapid method for the estimation of phagocytic function of granulocytes and opsonic activity in whole blood // T. Tono-Oka, U. Norihiro, M. Takohide et. al // Clin. Immun., Immunopathol. - 1983. - 26. - № 1. - P. 66–75.
300. Cheryan, M. Ultrafiltration and microfiltration handbook / M. Cheryan. - Lancaster: Technomic Publishing, 1998. - 527 p.
301. Cohen-Mantel E. Granulation: tout un savoir-faire // Process Mag.-1994,-1095. -P. 62–65.
302. Dairy Science and technology / P. Walsta [et al]. - 2 nd ed. - Boca Raton: CRC Press, 2006. - 768 p.
303. Dima P., Lungu E., Alexenco T. Reologia pastelor extrudabile pentru obtinerea placilor din gresie ceramica fina. // Mater, de constr., 1978. - v.8 - №1. -P. 19–22.
304. Dettre R.H., Jolmson R.E. Wetting. London., 1967, - P. 144–155.
305. Ingredients // Food Technol. - 1995. - 49, №2. - 72 p.
306. Ingredients // Food Trade Rev. - 1995. - 65, №12. - P.1–10.
307. Ingredients for dairy desserts and ice creams // Milk Ind. - 1994,. №12. - P. 29, 31–32.
308. Fabretto J., Vojnovic D., Campisi B. Chemometric studies on minor and trace elements in cow milk // J.Chim. Acta, 1994. - N 3. - P. 295–300.
309. Farber I., Petrov C. Verfahren zur Herstellung granulierter Instant-Getrankepolver. Institut für Getreide-verarbeitung. Patent 247836 A1, DRG. 1987.
310. Felk, H. Eignung von Vormischungen für Schweinefütterungsmischungen in der Schweinemast / H. Felk, H. Schubert, I. Brabant // Tierzucht. - 1985. - Vol. 39. - № 6. - P. 283–285.
311. Fuquay, J.W. Encyclopedia of dairy sciences / J.W. Fuquay, P.F. Fox, P.L.H. McSweeney. - Elsevier Ltd., 2011. - 4068 p.
312. Finot P. F. Chemical modifications of the milk proteins during processing and storage. Nutritional, metabolic and physiological consequences // Kiel. Milchwirt/Forschungsber, 1983. - Bd.35,№ 3, - P. 357–369.
313. Firth J. V., Proc. Aimer Blast Furnace, №4, 46, 1944. P. 46–69.

314. Food fortification. Technology and quality control. Report of an FAO technical meeting Rome, Italy, 20-23 November 1995.-Rome, 1996. 104 p.
315. Free-flowing whey concentrates. // Food Cngredients and Process. – 1992 – May. – 27 p.
316. Frunzulikă Georgikă.. Ceai alimentar instant si procedeu de obtinere a acestuia: Пат. 95733 CPP, МКИ⁴ А 23 F 3/30, А 23 P 1/06 / Trustul «Platar». - № 124353; Заявл. 30.07.1986; Опубл. 30.10.1988.
317. Fruity fillings and innovative ingredients from Kerry //Kennedy's Confect. – 1996. – 3, №10. – 45 p.
318. Gifss L., Yedrick T.I., Nutritional composition of sweet and acid-type dry wheys // J/Dairy Sci., V.79, 1997, №3, Pp. 4-5,10.
319. Granulierung von feindispersen Pulvern. Heire Gerald. “Ernahrung- Sindustrie”, 1988, N1-2, – P. 49–51.
320. Growell A.D. J.Chem. Phys., 1954, v. 22, №8. P.1397–1393
321. Handle F. Beitrag zur sogenannten Plastizitat von Ton-Wasser-Systemen. // Ziegelindustrie. - 1978. - №9. – P. 427–478.
322. Hansen R. Cardery milk products in Ireland frem stillr alcohol of valle// Nordeuropaesk. Mejeri – Tidsskrift.-1980.-Vol.46. – P. 1–17.
323. Heize Gerald. Granulierung von feindispersen Pulvern. «Ernahrung-Sindustrie», 1988, № 1–2, P. 49–51.
324. Henderson S., Pixon S.W. The adsorption of moisture by spray dried skimmed milk. – J/ Stored Prod. Res., 1980, 16, № 1. P. 47–49.
325. Hinrahan F.P., Bell R.W. Patent N⁰.3185580. Hungary. – 1965. P. 3.
326. Hilker E. Behandlung trockenempfindlicher Rohstoffe. // Ziegelindustrie/ - 1974. - №8. – P. 338–345.
327. Kessler, H.G. Lebensmittel-Verfahrenstechnik Schwerpunkt Molkereitechnologi / H.G. Kessler. – Weihenstephan, 1976. – 589 s. 276. Konrad, G. A large-scale isolation of native β -lactoglobulin: characterization of physicochemical properties and comparison with other methods / G. Konrad, B. Lieske // International Dairy Journal. – 2000. – Vol. 10. – P. 713–721.

328. Khramtsov A., Ryabtseva S., Evdokimov J., Serov A., Bordanov A. *Regenatinal Dairy Congress.*- Melbourne, 1994. – 301 p.
329. Harper, W. J. Biological properties of whey components / W. J. Harper // *A review The American Dairy Products Institutes, Chicago.* – 2009.–P. 235–239.
330. Heyman, M.B. For the Committee on nutrition: lactose intolerance in infants, children / M.B. Heyman // *Pediatrics.* – 2006. – № 118. – P. 1279–1286.
331. Hoolihan, L. Beyond calcium. The protective attributes of dairy products and their constituents / L. Hoolihan // *Nutrition today.* – 2004 – № 39(2). – P. 69–77.
332. Hossain M., Brooks J.D., Maddox I/S/New Zealand *J. Dairy Ski. Technol.*, 1983. – №18. –P. 161–168
333. Hoffmann K., Fischer K., Nowek G. Verfahren zur Herstellung von dratetischen Nahrungsmitteln und Getrankepulvern bzw. Granulaten. ;VEB Arzneimittelwerk Dresden Patent 247602 A1, DRG.
334. International Dairy Federation. *Bulletin of the International Dairy Federation: The world dairy situation 2007*, 423. – 2007. – P. 1–97.
335. International Dairy Federation. *Bulletin of the International Dairy Federation: The world dairy situation*, 2010. – № 446. – P 206.
336. Lachance, P. A. and Bauernfeind, J.C. Concepts and practices of nutrifying foods. In *Nutrient Additions to Food*, ed. J. C. Bauernfeind and P. A. Lachance // *Food and Nutrition Press, Connecticut.* – 1991.
337. Lund, D. B. Engineering aspects of nutrifying foods. In *Nutrient Additions to Food.* ed. J. C. Bauernfeind and P. A. Lachance // *Food and Nutrition Press, Connecticut.* – 1991.
338. Lyklema J. *Ponrif. acad. Dcitnt.*, 1967, №31. – P. 181–246.
339. Lee, H. M. Applying fuzzy set theory to evaluate the rate of aggregative risk in software development /H. M. Lee // *Fuzzy Sets and Systems.*-1996. - V.79.-Pp. 323-336.
340. Lindermeier, H. *Futterungsberater Schwein. Ferkel, Zuchtschweine, Mastschweine* / H. Lindermeier, H. Propstmeier, K. Straub. – Munchen: BLV Verlagsgesellschaft mbH, 1994. – 176 p.

341. Marshale Wayne E., Ahmedne Mohamed, Rao Ramu M., Johns Mitchelle M. Granular activated carbons from sugarcane bagasse: production and uses /. // *Int. Sugar J.* – 2000 – 102, № 1215 – P. 147–151.
342. Malafeev O.A., Kolokoltsov V.N. *Understanding game theory*, New Jersey, 2010. – 286 p.
343. McGeary R.K. *J.Am.Ceram.Soc.*. 1960. - v.44. - №10. - P.513.
344. Molina, M. R. Foods considered for nutrient addition: sugars. In *Nutrient Additions to Food*. ed. J. C. Bauernfeind and P. A. Lachance // *Food and Nutrition Press, Connecticut.* – 1991.
345. *Nutrition policy experiences in Northern Europe. Report from a consultation on implementation of national food and nutrition policies - organization and tools*, Copenhagen, 18-22 January 1988. - ICP/ NUT 134.
346. Newitt D.M., Conway-Jones J.M. // *Trans.Inst.Chem.Eng.* - v. 36, -№6-1958, –P. 422–442.
347. Ormos Z. Granulation and coating in the processing of plant raw materials: [Pap.] 9th Conf. Food Sci., Budapest, 28-29 May, 1992 // *Acta alim.* – 1993. – 22, № 1. – P. 59.
348. Owen, D. F. and McIntire, J.M. Technologies of the fortification of milk products. In *Technol. Fortification Foods // Proc. Workshop.* – 1975. – P. 44–65.
349. Pörnyei József, Gyöngyösi József, Szabó Gábor. Способ получения гранулированных пищевых порошков в вибропсевдоожигенном слое. Eljárás instant élelmiszerporok előállítására aerovibrofluidizált rétegben: Пат. ВНР 192811 ВНР, МКИ⁴ В 01 J 2/16 №2062/83; Заявл. 10.06.1983; Оpubл. 30.05.1988.
350. Pintauro N. *Agglomeration process in food manufacture. Food Processing Review* New Jersey, Noyes Data Corporation. 1977. – P. 45–48.
351. Pedersen A.H. Under sgelser vedro rende instant-skununet maelkspulver, St. Forsogmeieri/- 1973. – P. 78–79.
352. *Powder and bulk solids. Conference and exhibition preirew// Chem. Ing. (USA).*- 1998.-105-№4. Pp. 1261/1-1261/12.
353. Quick Richard Lawrence; Richard Lawrence Quick. *Beverage tablets: Заявка*

2196228. Великобритания, МКИ⁴ А 23 F 3/32 - № 8724483; Заявл. 19.10.1987; Оpubл. 27.04.1988; НКИ А 2 В 201
354. Ryley J. And Kajda P. Vitamins in thermal processing // Food Chemistry: 49.- 1994. –P. 119–129.
355. Roner E. Content of available lysine in heat treated milk producte // Kiel. Milchwirt. Forachungsber, 1983. – Bd.35, №3. – P. 313–314.
356. Rotkiewicz W. Wplyw wybranych technologicznych cechu rozmuch pelnego mleka w kocheticzne cechy roznych rodzajow pelneka w proszku. Zesz/ nauk ART Olstynie Technol. Zywnosci., 1979, № 14, – P. 223–270
357. Rumpf H. Hermann W. // Aufbereitungstechnik. - 1970. – v.II, №3.- P. I–17.
358. Rumpf H., Grundlagtn und Methoden des Granulierens./ Chemie Ing. Techn, 1998.-70, №6. – P. 590–624.
359. Reed J., Ackley G. A., Pricee D. B. Effect of compressive loading on the structure and yield strength of a porcelain extrusion // Sci. Ceram., vol. 12:Faenza. – 1984. – P. 139–144.
360. Sato Jirichi, Kurusu Toshiro and othe. Proce¹ de granulation a sec d¹extaits. Patent №8506480, France. MKU B 01 D 1/18; A23 K 3/28.
361. Schwab Cacmen. Whey-from a useless byproduct fo a delicious drink //Int. Food Market. And Technol. – 1994. – 8, №5. – P.18–20, 24.
362. Scott, K. Handbook of industrial membranes / K. Scott. – Oxford: Elsevier Advanced Technology, 1995. – 912 p.
363. Separation, Extraction and Concentration Processes in the Food, Beverage and Nutraceutical Industries / S. Rizvi. – Woodhead Publishing, 2010. – 694 p.
364. Simon, O. Probiotic feed additives – effectiveness and expected modes of action / O. Simon, A.Jadamus, W. Vahjen // J. Animal Feed Sci. – 2001. – Vol. 10. – Pp. 51-67.
365. Sibel, R. Handbook of fat replacers / R. Sibel, Sylvia A. Jones. – New York: CRC Press Boka Raton, 1996. – 327 p.
366. Shakir S., Gegum A. , Abdul Ali S. Studies on the soft drink tablets (STD) post commercial production problems and its solution.. Pakistan I. Sci. and Ind. Res., 1987,30, N 8, Pp. 639-642.

367. Shibiny S., Mahfour M.B. The use of skim milk permeate in the preparation of spray dried beverages. Part 1 – orange beverage Abd El. Food Chem. 1986, 20, № 2. – P. 107–115.
368. Sienkiewicz T., Riedal C. Molke und Molke verwertung.- Leipzig, 1986. – P.306
369. Sjiētē des Produits Nestlē. S. A., Song-Bodenstab Xiaomei, Eichler Paul. A malted beverage powder and process: 1068807 ЕПВ, МПК⁷ А 23 L2/39. № 99113385.1; 10.07.1999; Опубл. 17.01.2001.
370. Smith Robert Murray. Heating portion-late material. Alfa-Laval Cheese Systems Ltd., England. Patent N 8619879. 11.03.87.
371. Sommer E. Beitrag zur Frage der kapillaren Flussigkeitbewegung in parigen Stoffen bei Be – und Entfeuchtungsvorgangen Dess. TH Darmstadt. D 17, 1971. –P. 34–41.
372. Swiridenko Y., Smurygin V., Abramov D., Borovkova Y. Lactose hydrolysis by beta-galactosidase in milk sugar concentrated salutions // 24-th Internatinal Dairy Congress.- Melbourne.- 1994. – 469 p.
373. Sviridenko Y., Abdullaeva L. Light-alcohol beverage frem acid whey // 24-th International Dairy Congress.- Melbourne, 1994. – 468 p..
374. Song-Bodenstab Xiaomei, Eichler Paul. A malted beverage powder and process: Заявка 1068807 ЕПВ, МПК⁷ А 23 L2/39. Sjiētē des Produits Nestlē . S. A., № 99113385.1; Заявл. 10.07.1999; Опубл. 17.01.2001.
375. Stolle W.Bruck festigkeifsbestimmungen vonein granalien //CFI :Ber DKG.- 1992.- №9-h. – P. 326–330.
376. Tanihara Nozomu, Sonobe Kazunori, Homazaki Masanori, Takata Shoji., Method for preparing granular foods:. Пат. 5451421. США, МКИ⁶ А 23 L 1/00 / Hoise Food Industrial Co., Ltd. - № 139019; Заявл. 21.10.1993; Опубл. 19.09.1995; Приор. 21.10.92; № 4 – 283204 (Япония); НКИ 426/589
377. Tarjan J. Aufbereitungs-Technik, 1966. – №1.- P. 28–32.
378. Taguchi Yoshihiro //Femtai rogakkashi / I. Sjc Powder Technol., Iap.-1995-32,#4. P. 240–246.
379. Tigershiold M, Ilmoni P.A., Proceedings ob the Blast Furnace and Coke Ovens

Raw materials Conference, 1950, V9. P. 18–45.

380. Vycudilik P., Jedlicka P. Regulation par voie chimique des proprietes physiques de la pate ceramique verte. // Ind.ceram. - 1978. - №9. – P. 599–602.

381. Zeman, L. J. Microfiltration and Ultrafiltration: Principles and Applications / L.J. Zeman, A.L. Zydney. – New York: Marcel Dekker, 1996. – 365 p.

Графики изменения вероятностей состояний, полученные после завершения процедуры параметрической идентификации (в виде точек показаны экспериментальные значения вероятностей состояний продукта)

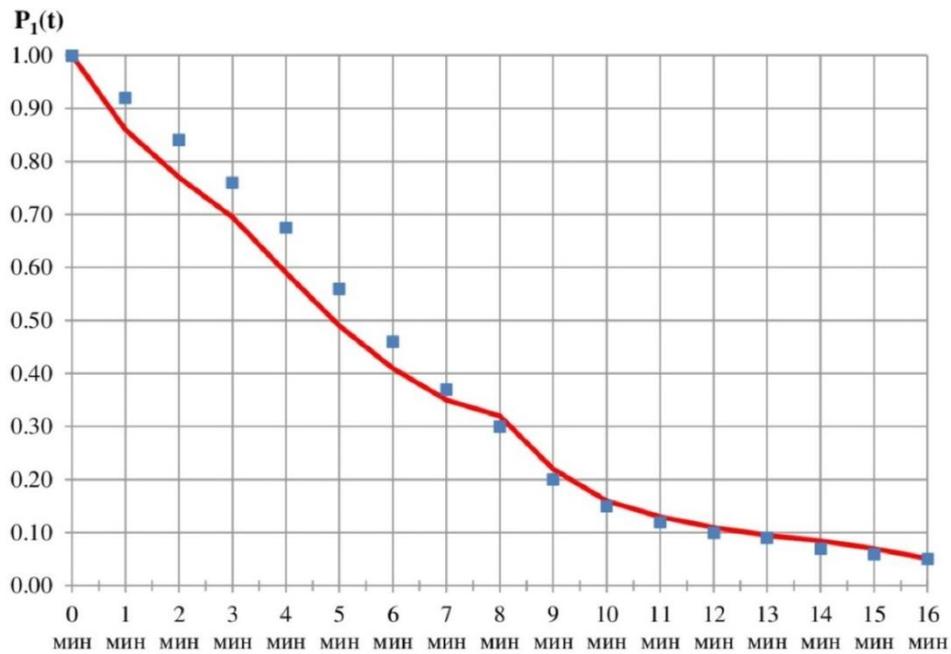


Рисунок П.1 – График изменения вероятности исходного состояния полидисперсного продукта в процессе гранулирования

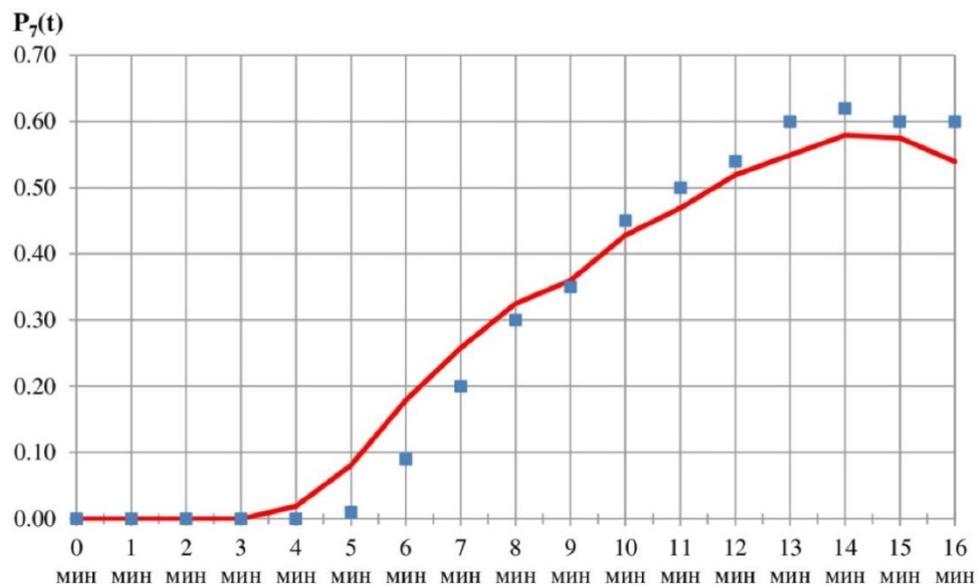


Рисунок П.2 – График изменения вероятности исходного состояния полидисперсного продукта в виде гранул (1,0-3,0) мм при требуемой плотности

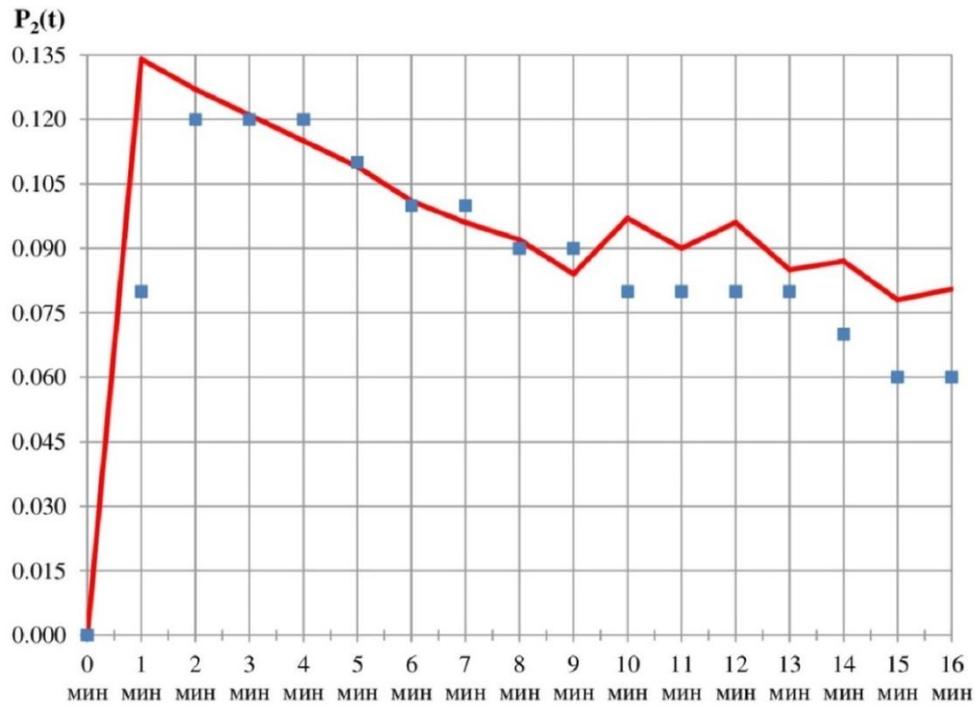


Рисунок П.3 – График изменения изменения вероятности исходного состояния полидисперсного продукта в виде зародышей в процессе гранулирования

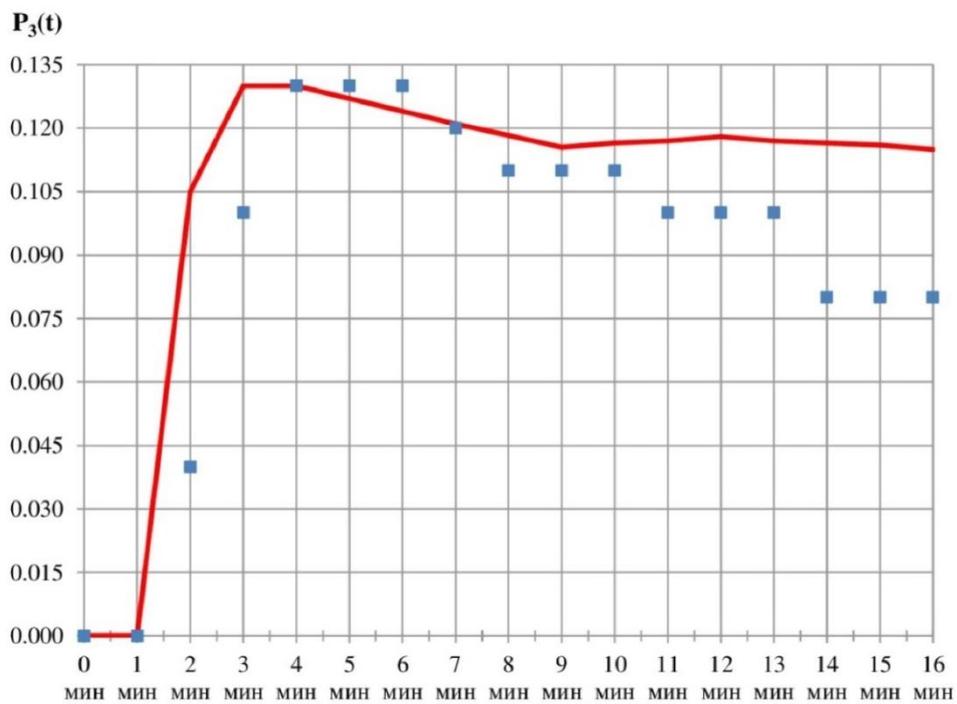


Рисунок П.4 – График изменения вероятности исходного состояния полидисперсного продукта в виде гранул (0,5-1,0) мм в процессе гранулирования

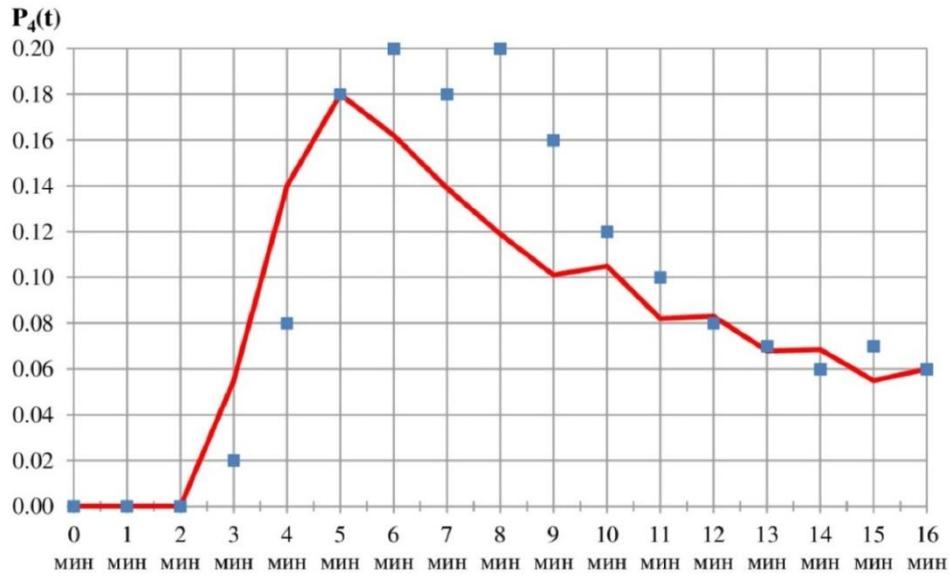


Рисунок П.5 – График изменения вероятности исходного состояния полидисперсного продукта в виде гранул (1,0-3,0) мм в процессе гранулирования

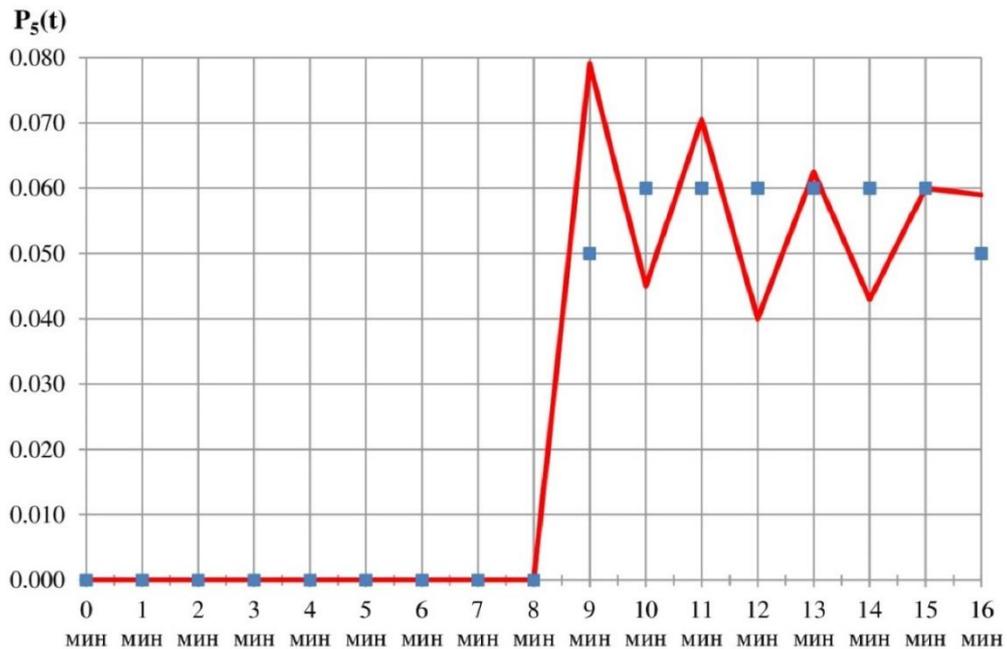


Рисунок П.6 – График изменения вероятности исходного состояния полидисперсного продукта в виде гарнисажа в процессе гранулирования

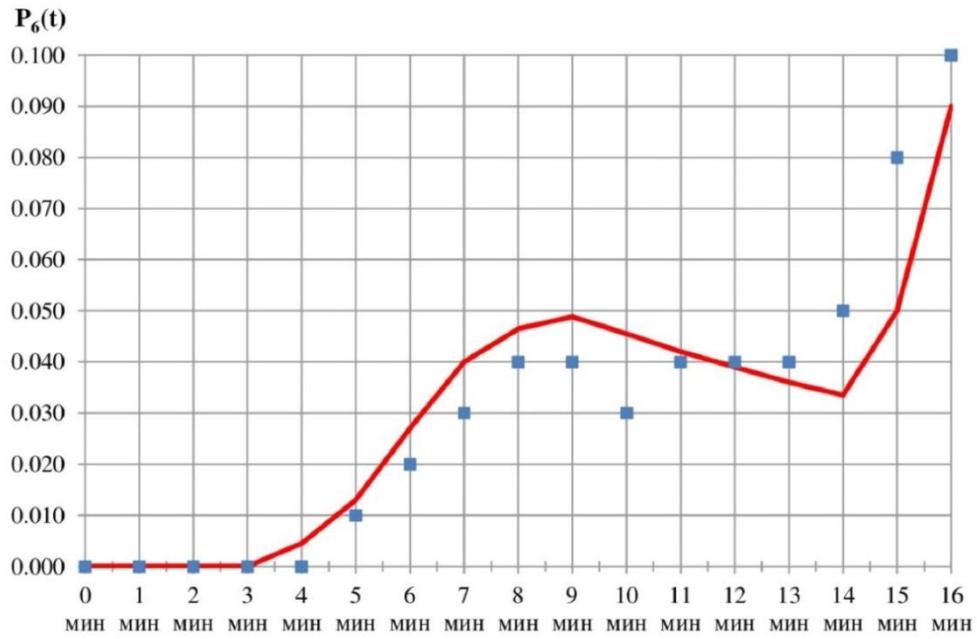


Рисунок П.7 – График изменения вероятности исходного состояния полидисперсного продукта в виде гранул (>3,0) мм в процессе гранулирования

ООО НПО «Здоровое питание»
 650514, Кемеровская обл., Кемеровский р-н,
 п. Металлплощадка ,ул. Спортивная, д.3 «А»
 ИНН 4234009729, тел.: 8-904-378-38-93



Все полученные результаты подтверждены экспериментальными данными промышленными испытаниями.

Были разработаны и утверждены:

1. Технические условия «Завтрак гранулированный на основе молочной сыворотки» - ТУ 9196-001-16362254-19;
2. Технологическая инструкция по производству завтрака гранулированного на основе молочной сыворотки;
3. Технические условия «Кисели плодово-ягодные, быстрорастворимые, гранулированные» - ТУ 9195-001-16362254-19;
4. Технологическая инструкция по производству киселей плодово-ягодных, быстрорастворимых, гранулированных.

По результатам совместных разработок получен 1 патент Российской Федерации.

Использование указанных результатов позволило создать и внедрить в производство новую линейку быстрорастворимых гранулированных продуктов функционального назначения (завтраков и киселей) на основе молочной сыворотки и местного растительного сырья.

Работа выполнялась в рамках реализации распоряжения правительства от 25 октября 2010 года N 1873-р «Основы государственной политики Российской Федерации в области здорового питания населения на период до 2020 года» и разработанной на её основе региональной губернаторской программы Кемеровской области «К здоровью через питание».

Члены комиссии:

Е.Е Петушкова
 С.Н. Кравченко
 А.Л. Майтаков

ООО «Научно-производственное объединение «Здоровое питание»
(ООО НПО «Здоровое питание»)

ОКП 91 9606

Группа Н 33

(ОКС 67.060)

У Т В Е Р Ж Д А Ю

Директор ООО НПО
«Здоровое питание»



А. А. Попов

2019 г.

ЗАВТРАК ГРАНУЛИРОВАННЫЙ НА ОСНОВЕ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ

Технические условия

(с изменениями и дополнениями)

ТУ 9196-001-16362254-19

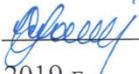
Дата введения в действие – 04 марта 2019 г.

РАЗРАБОТАНО

Соискатель, заведующий кафедрой

«Автоматизация производственных процессов и
автоматизированные системы управления»

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный
университет (КемГУ)»,

к.т.н., доцент  А. Л. Майтаков

«20» февраля 2019 г.

ООО НПО «Здоровое питание»

 Е. Е. Петушкова

«20» февраля 2019 г.

Кемерово 2019

ООО «Научно-производственное объединение «Здоровое питание»
(ООО НПО «Здоровое питание»)

ОКП 91 9606

Группа Н 33

(ОКС 67.060)

У Т В Е Р Ж Д А Ю

Директор ООО НПО

«Здоровое питание»

 А. А. Попов

« 20 » февраля 2019 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ
по производству завтрака гранулированного
на основе молочной сыворотки

Дата введения в действие – 04 марта 2019 г.

РАЗРАБОТАНО

Соискатель, заведующий кафедрой

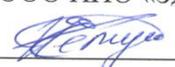
«Автоматизация производственных процессов и
автоматизированные системы управления»

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный
университет (КемГУ)»,

к.т.н., доцент  А. Л. Майтаков

«20» февраля 2019 г.

ООО НПО «Здоровое питание»

 Е. Е. Петушкова

«20» февраля 2019 г.

Кемерово 2019

ООО «Научно-производственное объединение «Здоровое питание»
(ООО НПО «Здоровое питание»)

ОКП 91 9606

Группа Н 33

(ОКС 67.060)

У Т В Е Р Ж Д А Ю

Директор ООО НПО

«Здоровое питание»

А. А. Попов

«03» 2019 г.



**КИСЕЛИ ПЛОДОВО_ЯГОДНЫЕ.
БЫСТРОРАСТВОРИМЫЕ, ГРАНУЛИРОВАННЫЕ**

Технические условия

(с изменениями и дополнениями)

ТУ 9195-001-16362254-19

Дата введения в действие – 04 марта 2019 г.

РАЗРАБОТАНО

Соискатель, заведующий кафедрой

«Автоматизация производственных процессов и
автоматизированные системы управления»

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный
университет (КемГУ)»,

к.т.н., доцент  А. Л. Майтаков

«20» февраля 2019 г.

ООО НПО «Здоровое питание»

 Е. Е. Петушкова

«20» февраля 2019 г.

Кемерово 2019

ООО «Научно-производственное объединение «Здоровое питание»
(ООО НПО «Здоровое питание»)

ОКП 91 9606

Группа Н 33

(ОКС 67.060)

У Т В Е Р Ж Д А Ю

Директор ООО НПО
«Здоровое питание»

А.А. Попов

2019 г.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНСТРУКЦИЯ
по производству киселей плодово-ягодных
быстрорастворимых, гранулированных

Дата введения в действие – 04 марта 2019 г.

РАЗРАБОТАНО

Соискатель, заведующий кафедрой

«Автоматизация производственных процессов и
автоматизированные системы управления»

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный
университет (КемГУ)»,

к.т.н., доцент  А. Л. Майтаков

«20» февраля 2019 г.

ООО НПО «Здоровое питание»

 Е. Е. Петушкова

«20» февраля 2019 г.

Кемерово 2019

Акционерной Уопсастыба
«ТУЙМААДА»
Үп-харчы
агропромышленной компанията



Акционерное общество
Финансовая агропромышленная
компания
«ТУЙМААДА»

677007 г. Якутск, ул. Автодорожная, 23

E-Mail: tuymaada@hotmail.com

от 15 апреля 2020г. № дО-1646



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
АО ФАПК «Туймаада»

П. С. Ефремов

«15» апреля 2020 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени доктора технических наук
Майтакова Анатолия Леонидовича

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы «Теоретические и практические аспекты синтеза технологических потоков производства многокомпонентных гранулированных пищекопцентратов с использованием молочной сыворотки», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы при разработке и внедрении в производство быстрорастворимых гранулированных киселей на основе молочной сыворотки и местного растительного сырья.

На АО ФАПК «Туймаада» при разработке и внедрении в производство быстрорастворимых гранулированных киселей на основе молочной сыворотки и местного растительного сырья были использованы:

1. Технические предложения по выполнению конструктивных схем.
2. Экспериментальные данные по исследованию свойств исходного сырья, а также полученных полидисперсных гранулированных киселей на основе молочной сыворотки.
3. Методика расчета и моделирования.
4. Эскизные проекты технологических линий.
5. Математические модели.
6. Рекомендации разработчиков.

Все полученные результаты подтверждены данными промышленных испытаний.

Были использованы:

1. Технические условия «Кисели плодово-ягодные, быстрорастворимые, гранулированные» - ТУ 9195-001-16362254-19;

2. Технологическая инструкция по производству киселей плодово-ягодных, быстрорастворимых, гранулированных.

Использование указанных результатов позволило создать и внедрить в производство новую линейку быстрорастворимых гранулированных продуктов функционального назначения на основе молочной сыворотки и местного растительного сырья.

Директор ООО
Производственный комбинат «Туймаада»



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«ХИМПРОМ»

650021, Кемеровская область-Кузбасс, г. Кемерово, ул. 1-я Стахановская, 35, офис 215.
ИНН/КПП 4205072099/420501001

р/счет 40702810726020103367 в Кемеровском отделении № 8615 ПАО Сбербанк, г. Кемерово
к/счет 30101810200000000612 БИК 043207612

E-mail: info@himprom42.ru

Сайт: <http://www.himprom42.ru>

Тел./факс 8 384 2 570592

№ 144-ИД от 15.05.2020.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени доктора технических наук
Майтакова Анатолия Леонидовича

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы «Теоретические и практические аспекты синтеза технологических потоков производства многокомпонентных гранулированных пищекоцентраов с использованием молочной сыворотки», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, внедрены и используются на ООО «Химпром».

Кемеровский «Химпром» является динамично развивающимся предприятием, деятельность которого направлена на увеличение номенклатуры выпускаемой продукции, повышение ее качества, удовлетворение потребности покупателей в химической продукции. Внедрение передовых технологий, техники, разработка и освоение производства новых продуктов, развитие межпроизводственных и межрегиональных связей, постоянное совершенствование структуры управления обеспечивает высокую конкурентоспособность продукции на внутреннем и внешнем рынке химической продукции

К внедрению приняты (и в большей части внедрены) результаты диссертационного исследования, посвященные вопросам гранулирования полидисперсных смесей (и, в частности, при производстве минеральных солей), а также аппаратного оформления технологического процесса.

Внедрение данной технологии позволяет:

- расширить ассортимент выпускаемой продукции;
- производить высококачественный, востребованный на рынке продукт;
- определить для предприятия новое перспективное направление.

Основные выводы и рекомендации учтены при осуществлении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на предприятии

Исполнительный директор



Чернышев А.В.



ООО «Биоцен»

634021, Томская область, г. Томск, ул. Елизаровых, д. 79/1, стр. 40

АКТ**Внедрения технологии производства
«Сухих гранулированных концентратов напитков с ягодным
наполнителем».**

28 апреля 2012г.

г. Томск

Томское производственное предприятие ООО «Биоцен» ввело в эксплуатацию технологическую линию по производству **«Сухих гранулированных концентратов напитков с ягодным наполнителем»**, по технологии разработанной авторским коллективом под руководством Майтакова А.Л. (Кемеровский технологический институт пищевой промышленности)

Достигнутая производительность технологической линии составила 200 кг в смену по конечному продукту (4000 шт. упаковок при производстве продукта одного наименования).

Эксплуатация технологической линии показала:

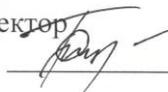
1. Продуманность, подбора и проектирования оборудования и согласованность процессов производства в целом.
2. Простоту обслуживания оборудования в сочетании с высоким качеством производимого продукта.
3. Возможность быстрого обучения ОПП, даже с низкой начальной квалификацией, по обслуживанию технологической цепочки.

Внедрение данной технологии позволило предприятию ООО «Биоцен»:

1. Расширить ассортимент производимой продукции.
2. Производить высококачественный, востребованный на рынке продукт из побочной продукции предприятия (фактически из «отходов» производства соков) с хорошим экономическим эффектом.
3. Определить для предприятия новое перспективное направление развития.

Генеральный директор
ООО «Биоцен»




_____ (О.Г.Тарбеев)