

На правах рукописи



**МИЛЛЕР ЕКАТЕРИНА СЕРГЕЕВНА**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ  
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ИНСТАНТ-НАПИТКОВ В  
ГРАНУЛИРОВАННОМ ВИДЕ**

4.3.3 Пищевые системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Кемерово 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кемеровский государственный университет» Министерства науки и высшего образования РФ.

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
**Плотников Константин Борисович**

**Официальные оппоненты:** **Корячкин Владимир Петрович,**  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», кафедра машиностроения, профессор

**Садов Виктор Викторович,**  
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Алтайский государственный аграрный университет», кафедра механизации производства и переработки сельскохозяйственной продукции, заведующий кафедрой

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина», г. Омск


Защита диссертации состоится «30» июня 2023 года в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.315.05 при ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» по адресу: 650056, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, 2 лекц. ауд., тел.: (8-384-2)39-05-37.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» <https://www.kemsu.ru/science/dissertation-councils/diss-24-2-315-05/protects/41008/>.

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

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

 Милентьева Ирина Сергеевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Согласно концепции, разработанной Минэкономразвития и утвержденной Правительством Российской Федерации 22 ноября 2018 г. (протокол № 34, раздел II, пункт 2) «Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года», должен осуществиться переход экономики от экспортно-сырьевой к инновационному пути развития за счет снижения энергоемкости и модернизации перерабатывающих производств. Многие напитки на отечественном рынке представлены в жидком концентрированном или сухом порошкообразном виде. Грануляция позволяет повысить сыпучесть продукта и снизить его слеживаемость. В последние годы все чаще стали внедряться единицы оборудования, включающие в себя несколько способов грануляции, что позволяет существенно интенсифицировать процесс с уменьшением отрицательных явлений того или иного способа. В качестве сырьевого компонента, отвечающего за структурообразование и влагоудержание, в традиционной технологии быстрорастворимых киселей используется картофельный крахмал. Повышение прочности может быть достигнуто не только за счет конструктивно нового исполнения аппаратного оформления, но и за счет изменения свойств сырья, что позволит получить продукт с более высокими показателями качества.

Вышеизложенное позволяет заключить, что применение традиционных способов в совокупности с новыми методами структурообразования позволит не только интенсифицировать процесс, но и получить более стабильный гранулометрический состав и более высокую прочность частиц. Системный анализ и синтез исходной и разработанной системы процессов позволяет определить наличие перехода системы из области суммативных систем в область стабильных. В этой связи необходимость модернизации данных технологий и технологических линий является актуальной задачей, стоящей перед современной наукой.

**Степень разработанности.** Исследованием структурообразования гранулированных продуктов из многокомпонентного полидисперсного сырья занимались как отечественные, так и зарубежные ученые, среди которых наибольший вклад в развитие научных основ данного процесса внесли: В. М. Витюгин, П. В. Классен, И. Г. Гришаев, В. И. Коротич, В. А. Лотов, Г. Г. Ефименко, Г. В. Губин, Н. Н. Бережной, В. С. Севостьянов, Г. В. Коршиков, З. Тарьян, Н. Rumpf, M. Wada и др. Среди отечественных ученых, которые занимались исследованиями в области системного анализа сложных производственных систем следует отметить В. А. Панфилова, А. М. Попова, А. Ф. Сорокопуда.

**Цель и задачи исследования.** Совершенствование и научное обоснование процесса гранулирования многокомпонентных инстант-напитков в грануляторах тарельчатого типа, обеспечивающего стабильный гранулометрический состав готового продукта.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- провести литературно-патентный обзор существующих способов получения гранулированных продуктов, конструкций для их осуществления и путей повышения эффективности с целью выбора направления дальнейших исследований;
- разработать вариант усовершенствования конструкции тарельчатого гранулятора с активатором, способной решить проблемы нестабильного гранулометрического состава гранул, большого количества мелкой фракции ввиду низкой прочности на истирание;
- исследовать взаимосвязь между параметрами процесса, свойствами исходного сырья и характеристиками готового гранулята, энергозатратами, установить рации-

ональные параметры процесса гранулирования в тарельчатом смесителе-грануляторе новой конструкции;

- определить соотношение сыпучих структурообразующих компонентов в смеси для гранулирования, позволяющее получить продукт с оптимальными структурно-механическими и органолептическими свойствами;

- на основе методики системного анализа и синтеза определить уровень стабильности и целостности технологического потока производства гранулированных киселей на основе смеси картофельного и рисового крахмалов, сахарной пудры, концентрата черники и провести сравнительный анализ с исходной линией;

- провести опытно-промышленные испытания смесителя-гранулятора в составе линии производства инстант-напитков и оценить энергетические затраты.

**Объект исследования** – процесс структурообразования в смесителе-грануляторе тарельчатого типа, многокомпонентные инстант-напитки.

**Предмет исследования** – определение рациональных параметров технологического процесса получения многокомпонентных инстант-напитков в смесителе-грануляторе тарельчатого типа.

**Научная новизна:**

- установлены зависимости между среднемодалым размером получаемых частиц, прочностью на истирание и статической прочностью, пористостью и режимными, конструктивными параметрами процесса структурообразования многокомпонентных полидисперсных гранулированных инстант-напитков в тарельчатом грануляторе новой конструкции с добавлением рисового крахмала;

- выявлена зависимость структурно-механических свойств готового продукта от количественного соотношения сыпучих структурообразующих компонентов в смеси;

- определены рациональные параметры процесса, определены удельные энергетические затраты на проведение процесса структурообразования гранулята в тарельчатом грануляторе новой конструкции, получена математическая модель, описывающая напряжение, действующее на лопасть в зоне работы активатора;

- установлен уровень стабильности и целостности разработанного технологического потока при внедрении нового аппаратного оформления подсистемы получения полуфабриката;

- разработан способ получения инстант-продуктов на основе концентратов плодово-ягодных соков с добавлением рисового крахмала (патент РФ № 2608729).

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в углублении знаний в вопросах структурообразования многокомпонентных полидисперсных инстант-напитков в гранулированном виде с добавлением рисового крахмала при использовании комбинированного способа агломерирования.

Практическая значимость. Предложенное аппаратное оформление стадии структурообразования в линии производства инстант-напитков было внедрено на ООО НПО «Здоровое питание». Применение смесителя-гранулятора с устройством распределения жидкого полуфабриката и вибрационным активатором, защищенного патентами РФ № 2340383, № 2583817, позволило снизить энергетические затраты за счет сокращения одной единицы оборудования – смесителя периодического действия, используемого для смешивания компонентов перед операцией гранулирования, и снижения количества несформированного продукта, отправляемого на рециркуляцию.

Полученные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.04.02 Технологические

машины и оборудование (уровень магистратуры) в ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» при выполнении выпускных квалификационных работ.

**Методология и методы исследований.** При проведении исследований использовался системный анализ и синтез технологического потока, эмпирическая часть исследований заключалась в применении следующих методов: ситовый и микроскопический метод, пикнометрический, определения статической прочности и прочности на истирание, пористости и структурно-механических свойств растворов.

**Положения, выносимые на защиту:**

- результаты анализа влияния связующего раствора на структурообразование гранулированного продукта;
- конструкция смесителя-гранулятора с устройством распределения вязкого связующего и вибрационным активатором;
- результаты исследований среднемодалного значения размера гранул и затрат мощности при различных режимно-технологических параметрах;
- математическая модель, описывающая напряжение на лопасть в зоне работы активатора;
- результаты исследования пористости, прочности на истирание, а также статической прочности при варьировании режимных параметров;
- анализ и синтез разработанной технологической системы производства инстант-напитков на основе ягодного сырья, картофельного и рисового крахмалов.

**Степень достоверности и апробации работы.** Достоверность полученных результатов исследований подтверждается воспроизводимостью результатов исследований, а также повторностью (не менее 3 повторностей), применением стандартных методов исследования, соответствующих поставленным в работе целям и задачам.

Основные положения диссертационной работы обсуждались на международных, Российских и региональных конференциях: IV Всероссийской конференции с международным участием студентов, аспирантов и молодых ученых «Пищевые продукты и здоровье человека» (Кемерово, 2011); Международной научной конференции «Технические науки и современное производство» (Шри-Ланка, 2013); X Международной научно-практической конференции «Европейская наука XXI века» (Пшемысль, 2014); Международной научной конференции «Пищевые инновации и биотехнологии» (Кемерово, 2014, 2016); Международной научно-практической конференции «Наука и образование: инновации, интеграция и развитие» (Уфа, 2014); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития науки и образования» (Москва, 2014); VII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Инновации в пищевой биотехнологии» (Кемерово, 2019); International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials «Technology of Processing, Storage and Recycling of Plant Crops» (Воронеж, 2020).

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Диссертационные исследования соответствуют п. 20 и 24 паспорта научной специальности ВАК РФ 4.3.3 Пищевые системы.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 22 печатных работах, в том числе в 8 статьях в реферируемых журналах, входящих в перечень ВАК, одна из которых в журнале, индексируемом в базах данных Scopus, 3 патентах на изобретения (2 патента на конструкцию гранулятора и 1 патент на способ производства) и 11 тезисах конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает введение, четыре главы, выводы, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 152

страницах, включая приложения. В работе присутствуют графические материалы в количестве 52 рисунков, а также таблицы – в количестве 7 шт. Список литературы состоит из 144 наименований отечественных и зарубежных источников.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведено современное состояние уровня развития технологий производства многокомпонентных инстант-напитков в гранулированном виде из растительного сырья, обоснована актуальность выбранной темы исследований, описана цель работы, научная и практическая новизна.

**В первой главе** приведены основные способы структурообразования многокомпонентных инстант-продуктов, а также аппаратное оформление процесса. Проведен литературно-патентный поиск новых технологий интенсификации процесса гранулирования. Установлено, что применение комбинированных способов гранулирования является наиболее перспективным методом, поскольку позволяет использовать преимущества каждого из них. Наиболее распространенным способом для производства инстант-напитков оказался метод окатывания, для его интенсификации используют активаторы различного типа, позволяющие структурировать продукт в зоне высоких сдвиговых усилий. Рассмотрены основные положения системного подхода в организации технологической линии и методы оценки уровня целостности.

Проведенный литературно-патентный обзор позволил сформулировать задачи исследования, направленные на совершенствование процесса структурообразования в тарельчатом грануляторе.

**Во второй главе** приведена схема организации исследования (рисунок 1). Весь цикл диссертационных исследований состоял из нескольких взаимосвязанных этапов. Приведено обоснование выбора материала исследования.

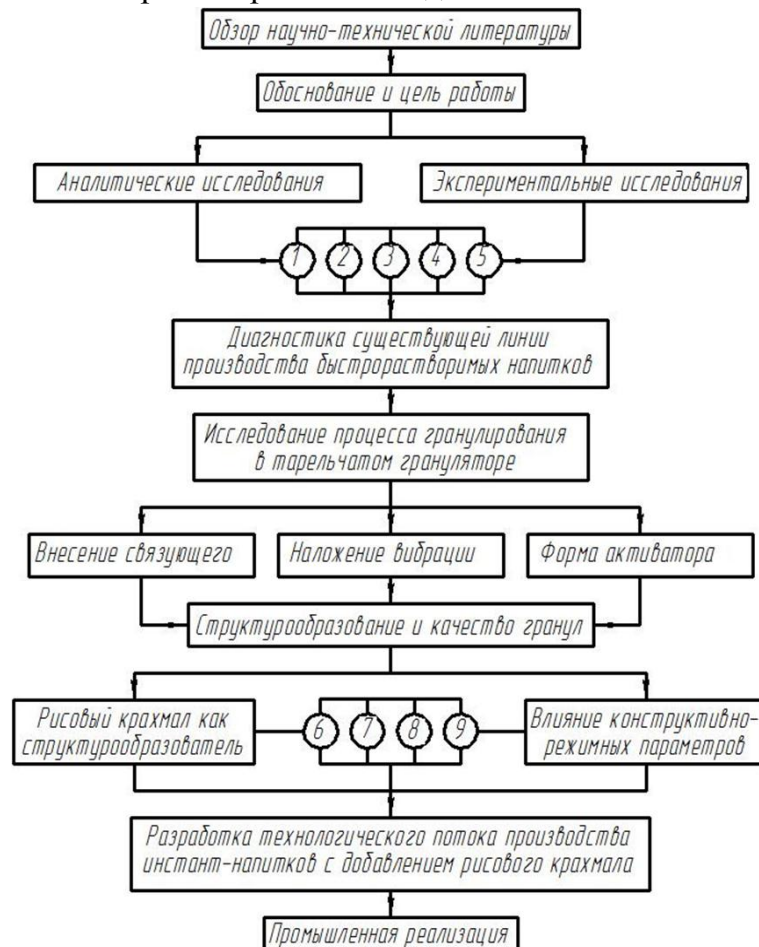


Рисунок 1 – Схема проведения исследований: 1 – насыпная плотность; 2 – сыпучесть; 3 – угол естественного откоса; 4 – влажность; 5 – дисперсность; 6 – гранулометрический состав; 7 – прочность; 8 – распадаемость; 9 – пористость

Представлена методика определения целостности технологических систем и уровня их организации с точки зрения системного подхода, которая используется для оценки качества функционирования линий, выявления подсистем с низкой стабильностью и дальнейшего поиска способа устранения выявленных проблем.

Рассмотрены методики определения технологических свойств порошкообразных материалов, дана оценка точности их измерений.

Исследование работы гранулятора проводилось на экспериментальной установке (рисунок 2). В наклонную тарель (1) смесителя-гранулятора подается крахмал, при помощи устройства подачи жидкой фазы (5) производится ввод концентрированного сока. Жидкая фаза в виде тонкого слоя распределяется по поверхности вращающегося диска (3), непрерывно срезается отбойным ножом (2). Далее полученная смесь отбрасывается на активатор (4), где происходит интенсивное смешение с остальной массой порошкообразной смеси, осуществляют подачу сахарной пудры. Происходит смешивание с получением однородной порошкообразной смеси сыпучих компонентов.

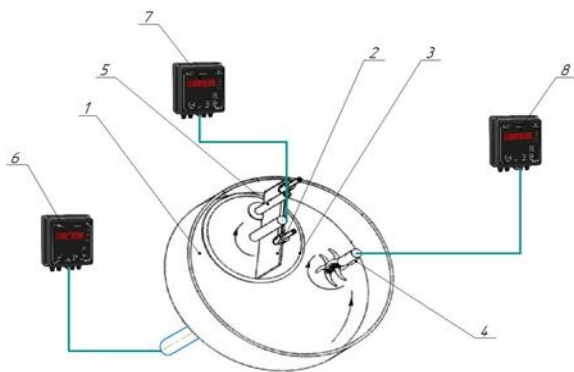


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки

В процессе проведения исследований контролировалась частота вращения тарели, активатора и диска. Для измерения применялись тахометры (6), (7), и (8) для тарели, диска и активатора, соответственно, типа TX01-RS.

В процессе исследования варьировались: частота вращения тарели  $n_T=30; 45; 60$  об/мин, частота вращения активатора  $n_A=600; 900; 1200; 1500$  об/мин, частота вращения диска  $n_P=15; 22,5; 30$  об/мин, амплитуда колебания активатора  $A_A=0,5; 1,5; 2,5$  мм, частота колебаний активатора  $\nu=20; 30; 40; 50$  Гц.

В третьей главе представлены результаты исследования физико-механических свойств смесей картофельного крахмала (КК) с модифицированным рисовым крахмалом (МРК) в пропорциях: 95 % КК и 5 % МРК; 90 % КК и 10 % МРК; 85 % КК и 15 % МРК, для изучения влияния МРК в составе гранулируемой смеси на форму и прочностные характеристики гранул. Для определения эффективного способа подачи жидкого связующего компонента в смеситель-гранулятор был поставлен ряд экспериментов.

В смеситель-гранулятор тарельчатого типа производили подачу связующего компонента тремя способами: капельным, форсуночным и наливным. Исходными сыпучими компонентами являлись: крахмал картофельный и рисовый; сахарная пудра, в качестве связующего раствора – сок ягод черники.

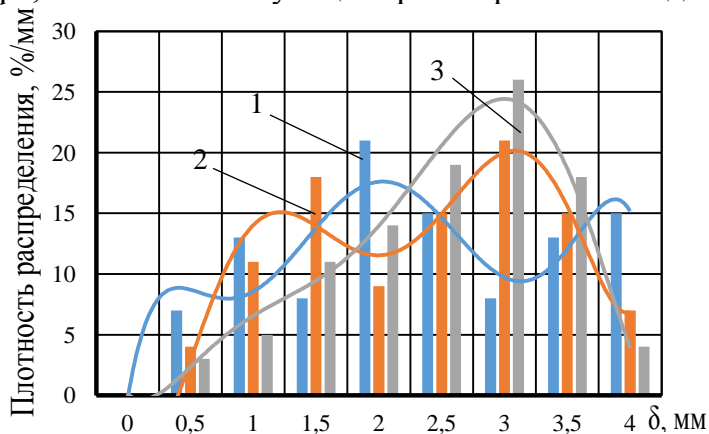


Рисунок 3 – Гистограмма плотности распределения частиц по размерам в зависимости от способа подачи связующего компонента: 1 – капельный способ; 2 – форсуночный способ; 3 – наливной способ

Результаты значений плотности распределения гранул от способа подачи жидкого связующего компонента представлены на рисунке 3. Анализируя гистограмму плотности распределения частиц по размерам, можно утверждать, что при использовании капельного способа подачи жидкого связующего компонента получаются гранулы с большим разбросом среднемодального размера, характер распределения размеров гранул полимодальный. Используя форсуночный способ подачи компонентов, возможно получить близкие по размеру час-



тицы жидкого связующего компонента, средних размеров готовых гранул: 1,5 и 3 мм, что соответствует бимодальному распределению. При использовании наливного способа подачи жидкого связующего компонента размеры готовых гранул близки к 3 мм, о чем свидетельствует гистограмма плотности распределения частиц и полученная линия тренда. В результате использования наливного способа подачи жидкого связующего компонента готовый продукт имеет размеры  $3 \pm 0,5$  мм в 63 % от общей массы готового продукта.

Однако наличие гранул с размерами менее 2,5 мм в количестве 33 % от общей массы готового продукта также является не удовлетворительным результатом и требует подбора рациональных режимных параметров ведения процесса, а именно: частоты вращения тарели  $n_T$ , об/мин; частоты вращения активатора  $n_A$ , об/мин; частоты вращения диска  $n_p$ , об/мин; амплитуды колебания активатора  $A_A$ , мм; частоты колебаний активатора  $\nu$ , Гц.

На основании результатов серии экспериментов с установленными интервалами варьирования обозначенных параметров построен ряд характерных графиков (рисунок 4–7).

Сравнение графиков 4 и 5 позволяет сделать вывод о том, что при более высоких значениях частоты вращения, частоты и амплитуды колебаний активатора наблюдается разрушающее воздействие активатора на образующиеся гранулы, что ведет к их переизмельчению и, как следствие, образованию менее прочных частиц, увеличению мелкой фракции, нестабильному гранулометрическому составу.

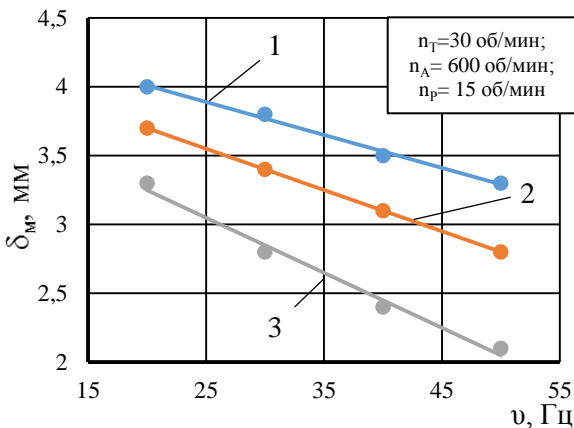


Рисунок 4 – Зависимость среднемодального размера частиц от частоты колебаний активатора: 1 –  $A_A = 0,5$  мм; 2 –  $A_A = 1,5$  мм; 3 –  $A_A = 2,5$  мм

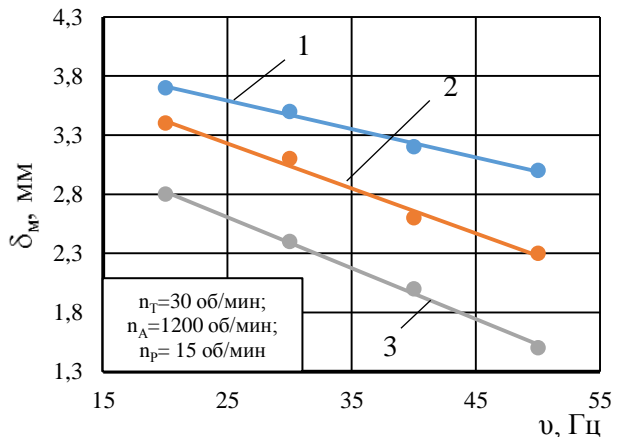


Рисунок 5 – Зависимость среднемодального размера частиц от частоты колебаний активатора: 1 –  $A_A = 0,5$  мм; 2 –  $A_A = 1,5$  мм; 3 –  $A_A = 2,5$  мм

Согласно рисунку 6 можно сделать заключение о том, что наиболее подходящие значения частоты вращения, позволяющие получать гранулы среднемодального размера  $3 \pm 0,5$  мм, находятся в интервале 900–1200 об/мин. Рисунок 7 отражает слабое влияние частоты вращения самой тарели гранулятора на среднемодальный размер частиц – всего в пределах десятых долей миллиметра. Также частота вращения диска подачи жидкого связующего компонента не оказывает большого влияния на среднемодальный размер гранул, объяснение в том, что вращение диска и тарели не ведет к турбулизации порошкообразной смеси внутри смесителя-гранулятора. Скорость сбрасывания зародышей зерен гранул с поверхности диска практически не оказывает влияния на наслоение новых слоев на поверхность гранул.



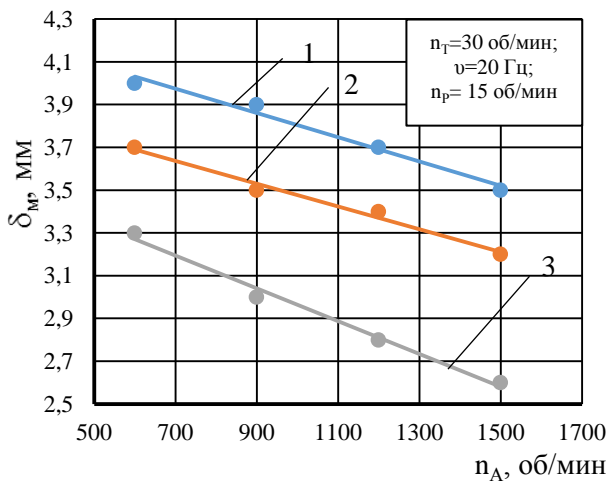


Рисунок 6 – Зависимость среднемодального размера частиц от частоты вращения активатора: 1 –  $A_A=0,5$  мм; 2 –  $A_A=1,5$  мм; 3 –  $A_A=2,5$  мм

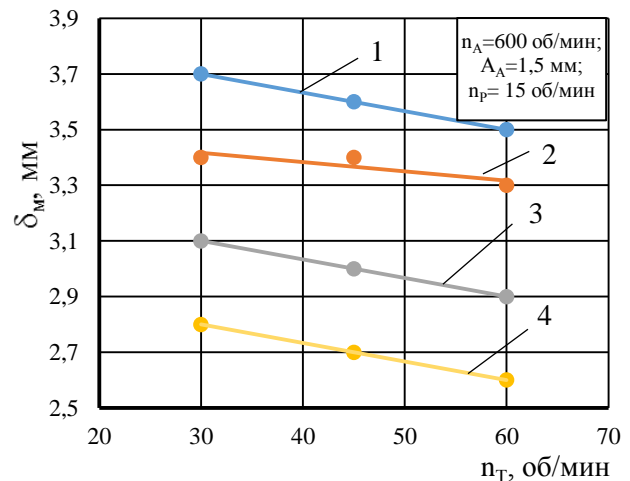


Рисунок 7 – Зависимость среднемодального размера частиц от частоты вращения тарелки: 1 –  $v=20$  Гц; 2 –  $v=30$  Гц; 3 –  $v=40$  Гц; 4 –  $v=50$  Гц

$v$  Активатор напротив оказывает решающее значение на образование гранул и их среднемодальный размер. Так увеличение частоты вращения активатора ведет к разрушению образующихся агломераций, а при высоких значениях и к переизмельчению гранул. Частота и амплитуда колебаний активатора также оказывают существенное влияние на формирование гранул и их среднемодальный размер. Это также связано с тем, что основная задача активатора – измельчать образующиеся крупные агломераты с целью усреднения размеров гранул. При этом высокие значения частоты и амплитуды колебаний активатора могут привести к переизмельчению материала, бимодальной или полимодальной схемам распределения размеров готовых гранул, что является не допустимым.

Оценить аналитическим путем влияние каждого фактора и их взаимное влияние на процесс затруднительно. Необходимо построить регрессионную модель на основе полученных экспериментальных данных.

Для определения экономической эффективности процесса корректнее воспользоваться отношением полезной мощности, идущей на процесс смешивания и гранулирования, к полной затраченной мощности ( $N_{\text{полез.}}/N_{\text{полн.}} \times 100$  %). Найдены регрессионные уравнения зависимости среднемодального размера гранул и отношения полезной мощности к полной от варьируемых значений параметров процесса. Значимость коэффициентов проверяли с помощью  $t$  – критерия.

$$\delta_M = 5,02 - 0,0037 * C1 - 0,00076 * C2 - 0,00127 * C3 - 0,3559 * C4 - 0,02 * C5, \quad R=96,3; \quad (1)$$

$$N_{\text{полез.}}/N_{\text{полн.}} = 36,99 - 0,032 * C1 - 0,0078 * C2 - 0,105 * C3 - 2,41 * C4 - 0,07 * C5, \quad R=97,6; \quad (2)$$

где  $R$  – коэффициент множественной регрессии.

Анализ уравнений 1 и 2 показывает, что на процесс гранулирования в большей степени оказывают влияние факторы, связанные с работой активатора. При этом данные факторы также оказывают большее влияние на КПД процесса. С целью нахождения рациональных параметров процесса гранулирования необходимо определить значения факторов, при которых среднемодальный размер гранул принимал бы значение 3 мм, а затраты мощности были бы минимальны. Воспользовавшись методом Ньютона, определили рациональные параметры процесса в программной среде Statistica 12.

В результате были получены следующие значения независимых факторов, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Рациональные параметры процесса

Частота вращения тарели $n_T$ , об/мин	Частота вращения активатора $n_A$ , об/мин	Частота вращения диска $n_D$ , об/мин	Амплитуда колебания активатора $A_A$ , мм	Частота колебаний активатора $\nu$ , Гц
32	980	20	1,7	25

При подстановке полученных значений параметров в уравнения 1 и 2 получаем значения среднемодального размера 3,02 мм и КПД 20,38 %, которые максимально соответствуют достижению поставленной цели.

Возможность получения гранул заданного диаметра и прочности обусловлена не только режимными параметрами работы аппарата, но и формой, конструктивными особенностями рабочего органа активатора, задача которого вносить дополнительные ударно-динамические нагрузки, повышающие давление деформирования массы до 5 МПа. Литературно-патентный обзор отразил существующие недостатки при использовании тех или иных форм активаторов в виде переуплотнения, переизмельчения гранул или напротив чрезмерного роста. Ввиду чего было исследовано сложное движение лопастей активатора через слой несвязанных частиц во влажном состоянии и потребовалось моделирование сил взаимодействия рабочего органа активатора с гранулируемой смесью. На рисунке 8 а представлена модель движения частиц в зоне действия активатора. На рисунке 8 б представлен сегмент лопасти активатора с установкой векторов скоростей движения частиц в зоне действия рабочего органа.

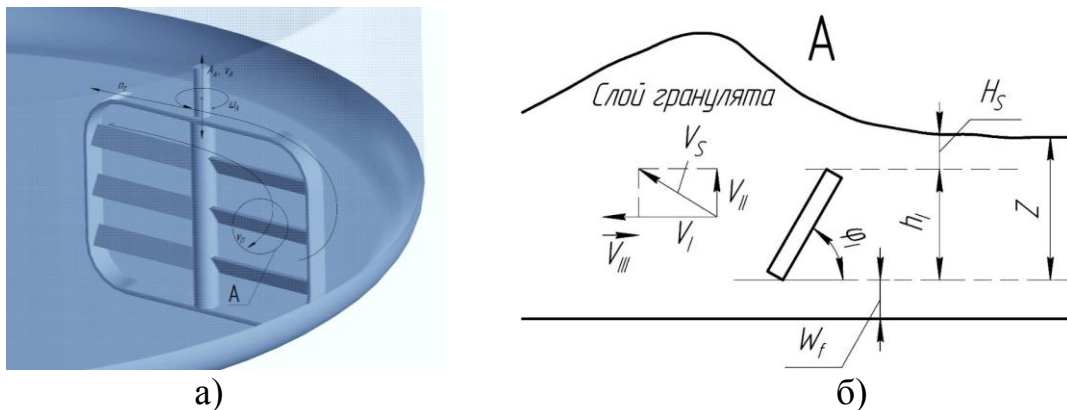


Рисунок 8 – Схема движения активатора через слой материала: а) сегмент тарельчатого гранулятора с активатором; б) сегмент лопасти активатора

Анализ работ *J. Bridgwater* и *D. F. Bagster*, моделирования эффекта трения и статического веса *R. M. Nedderman*, проведенные эмпирические исследования, учитывающие дополнительное возвратно-поступательное движение лопастей активатора, позволили получить следующую зависимость:

$$\frac{F_H}{\rho_P(1-\varepsilon_b)gh_l^2L_l} = f \left( \frac{Z}{h_l} \cdot \frac{L}{h_l} \cdot \frac{W_f}{h_l} \cdot \theta_f \cdot \frac{\left( \frac{\pi n_A r_A}{30} \sqrt{\frac{4}{3}gl(\sin \alpha - \frac{2\delta}{H} \cos \alpha) + v_0^2} \right)^2 + (A_A \cdot \vartheta_A)^2}{gh_l} \cdot \varphi_I \cdot \theta_P \cdot \theta_W \cdot \varepsilon_b \right), \quad (3)$$

где  $r_A$  – радиус лопасти активатора;  $\alpha$  – угол наклона тарели;  $l$  – длина пройденного пути;  $\delta$  – коэффициент трения качения;  $H$  – геометрический размер частицы;  $v_0$  –

начальная скорость частицы;  $L$  – длина лопасти;  $Z$  – погружение лопасти;  $\Theta_f$  – динамический угол трения между гранулами и внутренней поверхностью днища тарели;  $v_l$  – линейная скорость лопасти;  $\Theta_p$  – угол внутреннего трения;  $\Theta_w$  – угол трения стенки (гранула-лопасть);  $\varepsilon_b$  – пористость слоя частиц/гранул.

После преобразования вышеуказанной зависимости получили математическую модель, отражающую величину силы на единицу длины лопасти:

$$\frac{F_H}{L_I} = \frac{\pi \cdot d_a^3}{6} \rho_a \alpha_I \left( \left( \left( \frac{\pi \cdot n_A \cdot r_A}{30} - \sqrt{\frac{4}{3} g l \left( \sin \alpha - \frac{2\delta}{H} \cos \alpha \right) + v_0^2} \right)^2 + (A_A \cdot \vartheta_A)^2 \right) / h_I \right), \quad (4)$$

где  $\alpha_I$  – константа пропорциональности, определенная *J. Bridgwater* и *D. F. Bagster*.

Полученные зависимости пригодны для подбора режимных, конструктивных параметров в зависимости от требуемых среднемодалых размеров гранулята. Обработка полученных данных позволила установить, что результаты расчетов имеют расхождения с эмпирическими данными не более 5 %.

Благодаря полученной модели можно подбирать различные формы лопастей, угловые скорости, диаметр описанной окружности, регулируя скорость и силу удара. Учитывая, что прочность структуры гранулы неоднородна и к периферии уменьшается, за счет изменения силы удара геометрические размеры гранул и их плотность можно регулировать, стабилизируя этим весь процесс структурообразования.

**В четвертой главе** представлены результаты исследований свойств гранул инстант-напитка и приготовленного раствора. На графике (рисунок 9) представлены зависимости напряжений сдвига от скорости сдвига 10 %-ных растворов киселей при варьировании содержания МРК в общей смеси от 5 до 15 %. Из графика видно, что величина зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига для смеси крахмалов 90 % КК и 10 % МРК (кривая 2) и КК (кривая 4) имеет идентичные значения. Эффективная вязкость полученного раствора была определена через параметры напряжения и скорости сдвига.

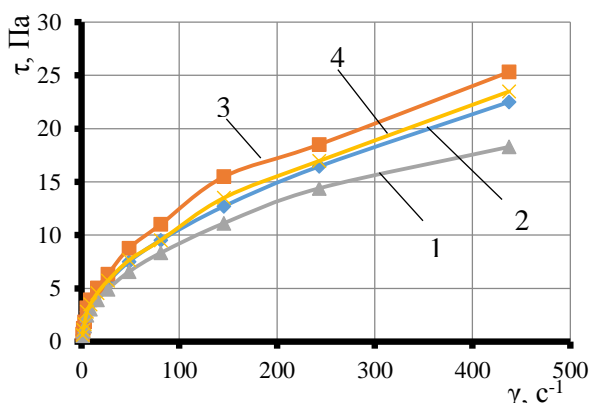


Рисунок 9 – Зависимости напряжений сдвига от скорости сдвига 10%-ных растворов: 1 – 95 % КК и 5 % МРК; 2 – 90 % КК и 10 % МРК; 3 – 85 % КК и 15 % МРК; 4 – 100 % КК

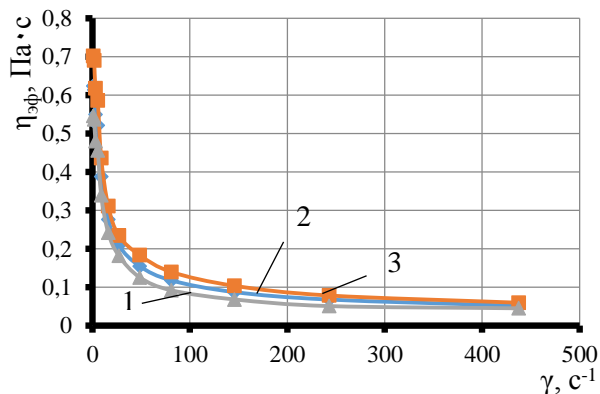


Рисунок 10 – Зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига 10%-ных растворов: 1 – 95 % КК и 5 % МРК; 2 – 90 % КК и 10 % МРК; 3 – 85 % КК и 15 % МРК

Из графика (рисунок 10) видно, что при сравнительно низких скоростях (0–15 с<sup>-1</sup>) наблюдается значительная разница показателей эффективной вязкости и в случае с растворами, содержащими 5 % и 15 % МРК, составляет порядка 1,6 раза. При увеличении скорости происходит снижение разности результатов. На графике не указаны зна-

чения эффективной вязкости для раствора с 100 % содержанием нативного КК, поскольку величины были достаточно близкие со СК 90 % КК и 10 % МРК.

Далее была осуществлена обработка результатов исследований структурных характеристик растворов приготовленных напитков в программе И. А. Литвиновой. Это позволило установить, что зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига описывается уравнением Оствальда-де-Вилля. Получены уравнения, описывающие структуру системы при температуре напитка 95–100 °С (сразу после растворения гранул в воде) и после остывания приготовленного напитка до 20 °С:

$$\tau = 0,57 \cdot \dot{\gamma}^{0,62}, \quad (5)$$

$$\tau = 1,83 \cdot \dot{\gamma}^{0,37}. \quad (6)$$

Увеличение коэффициента консистенции с 0,57 до 1,83 и уменьшение индекса течения с 0,62 до 0,37 объясняется повышением вязкости раствора в процессе остывания. Анализ полученных зависимостей показал, что использование смеси крахмалов 90 % КК и 10 % МРК позволяет достичь аналогичных значений параметров эффективной вязкости и напряжения сдвига, как и у раствора напитка, содержащего 100 % нативного КК.

Анализ результатов исследований распадаемости гранул (рисунок 11) показал, что добавление МРК не приводит к существенному увеличению времени распадаемости при условии одинаковых величин варьируемых параметров ( $n_T = 32$  об/мин,  $n_P = 20$  об/мин,  $n_A = 980$  об/мин;  $A_A = 1,7$  мм,  $v = 25$  Гц). На гистограмме рисунка 12 явно выражена зависимость изменения скорости распадаемости от величины прилагаемой нагрузки. При ее росте происходит увеличение времени разрушения гранулы и проникновения частиц в межсетчатое пространство. В данном случае диффузионное проникновение очень замедленно, поэтому при комплексном анализе таких факторов, как среднемодалный размер, прочность, пористость и скорость распадаемости, можно установить рациональные параметры, которые необходимы при проектировании производства определенного вида продукции.

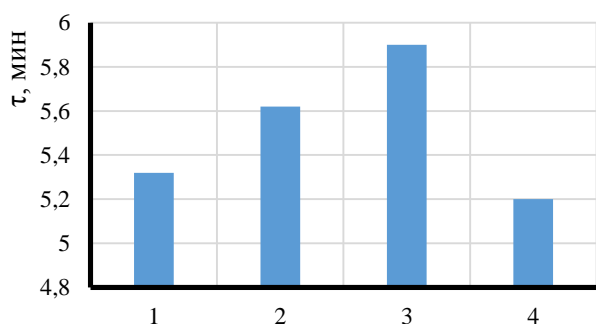


Рисунок 11 – Зависимость скорости распадаемости: 1 – 95 % КК и 5 % МРК; 2 – 90 % КК и 10 % МРК; 3 – 85 % КК и 15 % МРК; 4 – 100 % КК

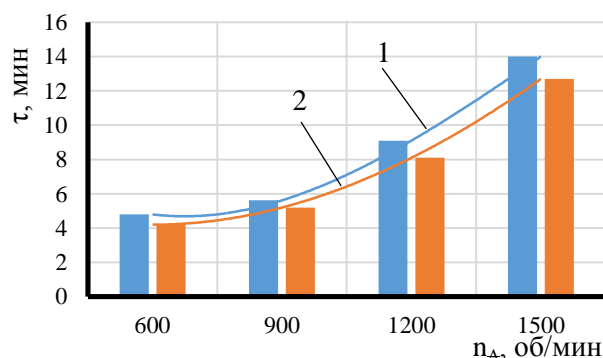


Рисунок 12 – Зависимость скорости распадаемости от частоты вращения активатора: 1 – 100 % КК; 2 – 90 % КК и 10 % МРК

На рисунке 13 представлена зависимость распадаемости от величины пористости гранулята, из которой видно, что при снижении пористости наблюдается резкое увеличение времени проникновения рабочей жидкости в гранулу. Также приведены результаты исследования прочности получаемого гранулята в зависимости от варьируемых параметров работы аппарата. Прочность гранул обеспечивает ее целостность и устойчивость к разрушению, истиранию – образованию мелкой фракции.

На рисунке 14 представлена зависимость содержания мелкодисперсной фракции от амплитуды и частоты колебаний активатора ( $n_T = 32$  об/мин,  $n_P = 20$  об/мин,  $n_A = 1200$  об/мин). Графики демонстрируют снижение процентного содержания фракции менее 0,5 мм с 5 % до 1 % при 20 Гц и 50 Гц соответственно, что говорит о существенном влиянии на прочность структуры готовой гранулы при увеличении значений этих параметров. Из графиков видно, что повышение амплитуды в начальный период сопровождается резким ростом прочности получаемого продукта на истирание, а затем происходит снижение значения данной зависимости.

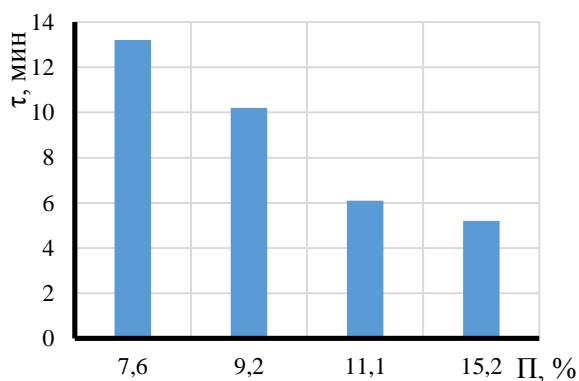


Рисунок 13 – Гистограмма зависимости скорости распадаемости от пористости гранулята

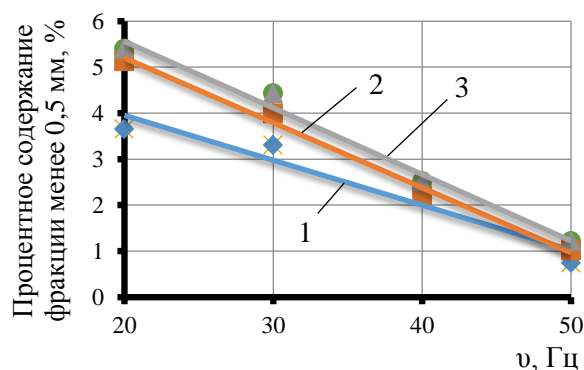


Рисунок 14 – Зависимость процентного содержания мелкодисперсной фракции от частоты: 1 –  $A_A = 0,5$  мм; 2 –  $A_A = 1,7$  мм; 3 –  $A_A = 2,5$  мм

Согласно полученным результатам (рисунок 15) можно заключить, что повышение частоты вращения активатора приводит к повышению прочности на истирание получаемого гранулята вследствие наложения высоких значений сдвиговых усилий, о чем также свидетельствует снижение количества мелкой фракции с 7 % до 1 % при максимальной частоте вращения в 1500 об/мин. Из рисунка 16 видно, что прочность гранул на истирание при гранулировании смеси напитка на основе 100 % КК ниже и дает на 1 % больше мелкой фракции размером менее 0,5 мм по сравнению с использованием смеси КК и МРК в рецептуре напитка.

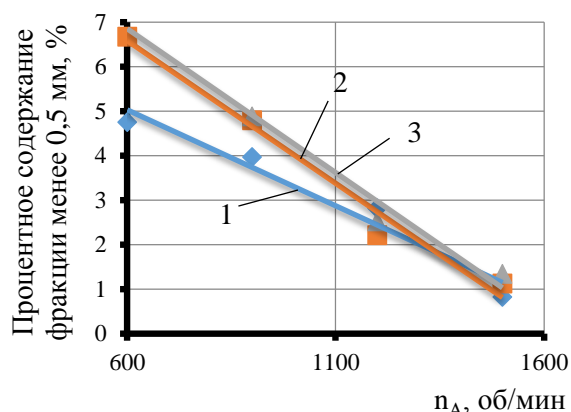


Рисунок 15 – Зависимость процентного содержания мелкодисперсной фракции от частоты вращения активатора ( $n_T = 32$  об/мин,  $n_P = 20$  об/мин,  $\nu = 25$  Гц): 1 –  $A_A = 0,5$  мм; 2 –  $A_A = 1,7$  мм; 3 –  $A_A = 2,5$  мм

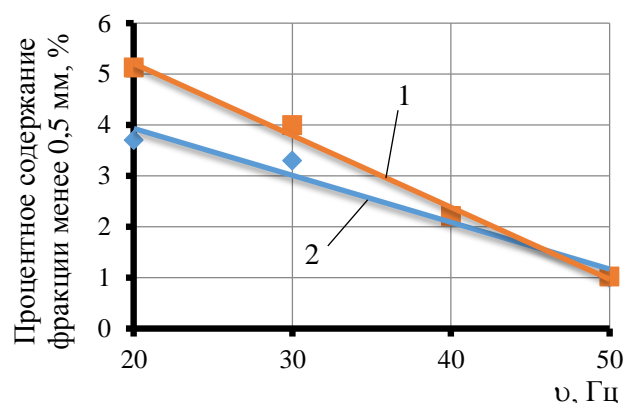


Рисунок 16 – Зависимость процентного содержания мелкодисперсной фракции от частоты колебаний активатора ( $n_T = 32$  об/мин,  $n_P = 20$  об/мин,  $n_A = 980$  об/мин,  $A_A = 1,7$  мм): 1 – КК; 2 – 90 % КК и 10 % МРК

Согласно полученным значениям можно установить, что использование смеси КК и МРК позволяет получить гранулы, более устойчивые к истиранию при установ-



ленных рациональных значениях параметров работы аппарата. Значение прочности гранул на истирание напрямую зависит от пористости продукта, при этом наблюдается именно обратная зависимость.

Полученные значения (рисунок 17) явно указывают на уменьшение пористости при увеличении динамических нагрузок. Это связано с уплотнением гранул и деформацией структурного скелета при окатывании. Согласно графикам на рисунке 17 пористость гранулы снижается до 8 % при превышении частоты вращения за 1400 об/мин. При уплотнении отдельных частиц или слоев частиц последние в процессе сжатия будут разрушаться. Для одинарных частиц степень разрушения будет аналогична разлому в зависимости от ударной вязкости этих гранул. Из графика, представленного на рисунке 18, видно, что частота колебаний активатора резко повышает прочность частиц, в среднем она возрастает в два раза при варьировании параметров процесса.

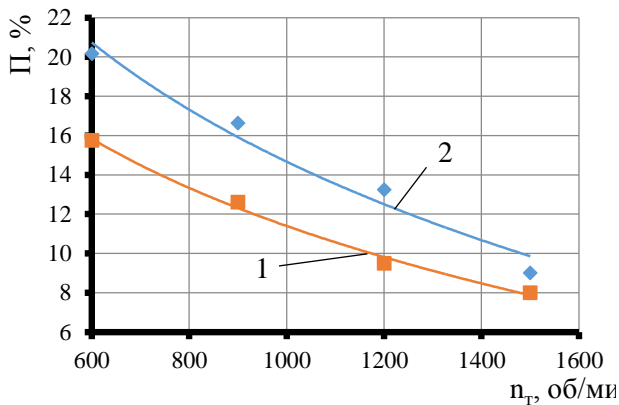


Рисунок 17 – Зависимость пористости получаемых гранул от частоты вращения активатора ( $n_T = 32$  об/мин,  $n_P = 20$  об/мин,  $v = 25$  Гц): 1 –  $A_A = 0,5$  мм; 2 –  $A_A = 1,7$  мм

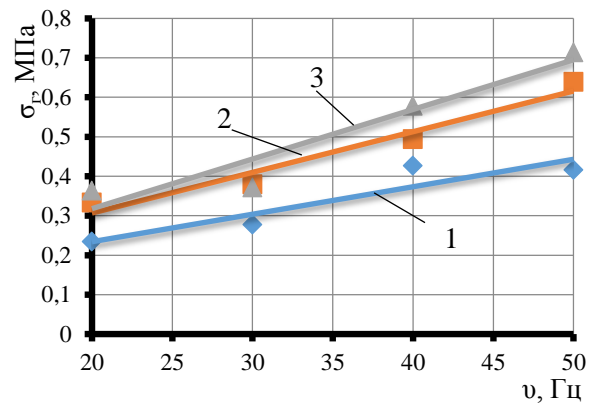


Рисунок 18 – Зависимость прочности получаемых гранул при сжатии от частоты колебаний активатора ( $n_T = 32$  об/мин,  $n_P = 20$  об/мин,  $n_A = 980$  об/мин): 1 –  $A_A = 0,5$  мм; 2 –  $A_A = 1,7$  мм; 3 –  $A_A = 2,5$  мм

Зависимость (рисунок 19) прочности получаемых гранул при одноосном сжатии от амплитуды колебаний показывает, что при повышении амплитуды колебаний величина изменения прочности гранул стремится к нулю, следовательно, амплитуда колебаний не оказывает существенного влияния на прочность гранул.

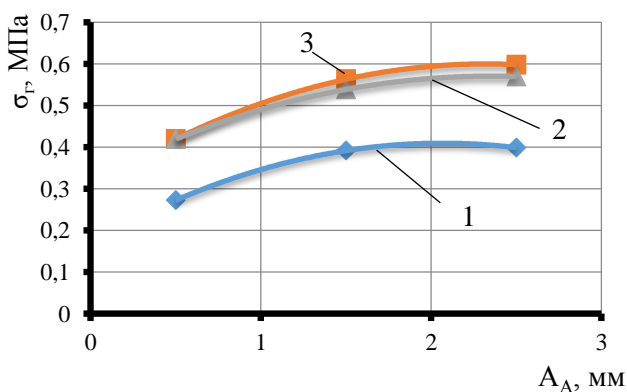


Рисунок 19 – Зависимость прочности получаемых гранул при сжатии от амплитуды колебаний активатора: 1 –  $n_A = 600$  об/мин; 2 –  $n_A = 980$  об/мин; 3 –  $n_A = 1200$  об/мин

Из графика видно, что изменение прочности при частоте вращения активатора 980 и 1200 об/мин имеет близкие кривые, по которым виден ее рост в среднем на 30 % при увеличении амплитуды колебаний от 0,5 до 2,5 мм. Использование СК позволяет получить большую прочность образцов при тех же значениях варьируемых параметров, что связано с более развитой поверхностью контакта фаз и плотностью укладки частиц в грануле.

Применение комбинированного способа агломерирования в смесителе-грануляторе в рамках установленных рациональных параметров позволяет получить гранулят с более развитой капиллярной системой, сравнительно небольшим снижением статической прочности и более правильной сферической формой, что повышает каче-

ство и органолептические показатели напитков. С целью проверки полученных результатов была проведена оценка уровня организации модернизированной технологической линии производства быстрорастворимых гранулированных напитков, функционирующей на ООО НПО «Здоровое питание», как сложной системы, состоящей из четырех подсистем получения: А – готового продукта, В – полуфабриката в виде влажного гранулята, С<sub>1</sub> – ягодного сырья, С<sub>2</sub> – сухих сыпучих компонентов. Целостность исследуемой системы определялась по следующему выражению:

$$\theta_{C_2C_1BA} = \eta_{C_2} + \eta_{C_1} + \eta_{B/C_1C_2} + \eta_{A/BC_1C_2} - 3, \quad (7)$$

где  $\eta_{C_1}, \eta_{C_2}$  – стабильность функционирования подсистемы С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub> соответственно;  $\eta_{B/C_1C_2}$  – условная стабильность подсистемы В относительно подсистем С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub>;  $\eta_{A/BC_1C_2}$  – условная стабильность подсистемы А относительно подсистем В, С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub>.

Системный анализ и синтез исходной линии на начальном этапе исследований позволил выявить подсистему, вносящую наибольшее возмущающее воздействие на уровень стабильности всего технологического потока – это подсистема В – формирования гранул с заданными физико-механическими свойствами ( $\eta=0,65$ ). В графическом виде совершенствование технологий представлено в виде диаграммы. Значение целостности составляло 0,53, система находилась в области плохо организованных суммативных систем (рисунок 20). Замена тарельчатого гранулятора подсистемы В на смеситель-гранулятор с устройством распределения жидкого полуфабриката и вибрационным активатором позволила: сократить единицу оборудования (смеситель периодического действия для предварительного смешивания компонентов перед операцией гранулирования); повысить однородность и обеспечить унимодальность распределения гранул. После модернизации подсистемы В уровень организации технологической линии был повторно определен по формуле 7:

$$\theta_{C_2C_1BA} = 1 + 1 + 0,859 + 0,92 - 3 = 0,779.$$

Уровень целостности системы после внедрения новых технологических подходов составил 0,779 благодаря повышению уровня стабильности подсистемы В, отвечающей за получение полуфабриката с заданными показателями качества в виде влажного гранулята.

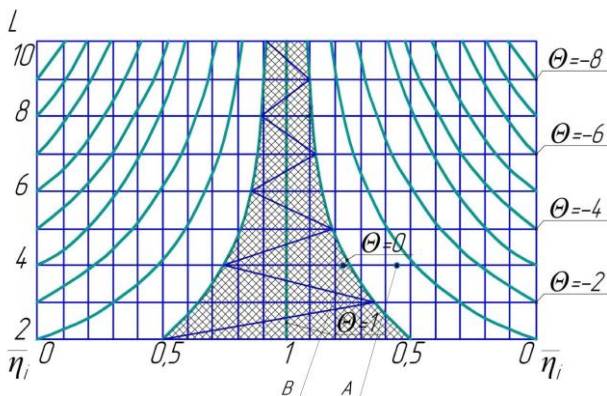


Рисунок 20 – Диаграмма процесса развития технологической системы: А – изначальная целостность системы; В – полученная целостность системы

Из приведенной диаграммы видно, что целостность системы существенно возросла при том же количестве подсистем – это свидетельствует о ее переходе из области суммативных систем в область высокоорганизованных.

Апробация данной системы процессов в ООО НПО «Здоровое питание» показала повышение производительности участка структурообразования на 20 кг/ч и снижение удельных энергозатрат на 12,9 % по сравнению с используемым до модернизации оборудованием данного участка.



## ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Цель диссертационной работы достигнута, о чем свидетельствуют полученные выводы и результаты:

1. Проведен литературно-патентный обзор, в результате которого выявлено, что для получения инстант-напитков заданного качества и гранулометрического состава целесообразно использовать тарельчатые грануляторы, работающие по принципу окатывания, с применением способов повышения эффективности их работы в виде наложения вибрации.

2. Разработана новая конструкция смесителя-гранулятора с активатором и устройством подачи вязкого связующего, защищенная двумя патентами РФ, позволившая повысить стабильность гранулометрического состава напитка со среднемодальным значением  $3 \pm 0,5$  мм, снизить количество фракции размером менее 0,5 мм до 4,5 %.

3. Определена зависимость среднемодального размера гранул и энергозатрат от режимных параметров аппарата в виде регрессионных уравнений, установлены рациональные значения этих параметров:  $n_T = 32$  об/мин;  $n_A = 980$  об/мин;  $n_P = 20$  об/мин;  $A_A = 1,7$  мм;  $v = 25$  Гц.

4. Установлено соотношение КК и МРК в смеси 9:1 соответственно, позволяющее получить продукт с оптимальными органолептическими и структурно-механическими свойствами: гранулы прочностью 0,5–0,6 МПа, пористостью 15–16 %, скоростью распадаемости 5,6 мин.

5. Проведенный системный анализ и синтез разработанного технологического потока позволили определить уровень его стабильности и целостности, который повысился с 0,53 до 0,779, благодаря чему удалось перевести систему из суммативной области в организованную.

6. Внедрение новой конструкции смесителя-гранулятора в линию производства инстант-напитков на ООО НПО «Здоровое питание» повысило производительность участка формования гранул на 20 кг/ч, снизило удельные энергозатраты на 12,9 % по сравнению с прототипом.

## ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ

### Статьи в журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus

1. Borodulin, D. M. Flour Baking Mixes: Optimal Operating Parameters for Vibration Mixers Food Processing / D. M. Borodulin, D. M. Sukhorukov, O. N. Musina, M. T. Shulbaeva, T. V. Zorina, D. I. Kiselev, **E. S. Miller** // Food Processing: Techniques and Technology. – 2021. – Т. 51. – № 1. – Р. 196–208. DOI: 10.21603/2074-9414-2021-1-196-208.

### Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. **Миллер, Е. С.** Основные направления оптимизации формирования структур в дисперсных системах / Е. С. Миллер, А. М. Попов, Р. Ю. Романенко, Д. В. Доня, А. А. Попов // Техника и технология пищевых производств. – 2013. – № 4. – С. 118–121.

2. Попов, А. М. Особенности процессов и технологии получения быстрорастворимых гранулированных киселей на основе аронии / А. М. Попов, **Е. С. Миллер**, Д. В. Доня, Е. Е. Петушкова, К. С. Якимчук. – Текст: электронный // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. URL: <http://www.science-education.ru/117-13103> (дата обращения: 19.06.2014)

3. **Миллер, Е. С.** Диагностирование технологических параметров качества подсистемы коагуляционного структурирования гранул / Е. С. Миллер, Д. В. Доня,

А. М. Попов, А. А. Попов, Р. Ю. Романенко // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 6 (ч. 6). – С. 1144–1148.

4. **Миллер, Е. С.** Особенности формирования структур в технологии получения полидисперсных продуктов / Е. С. Миллер, А. М. Попов, А. С. Мамонтов, А. В. Коняев, И. И. Бернекер // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 2. – С. 1866–1870.

5. Кравченко, С. Н. Совершенствование процесса экстрагирования в производстве быстрорастворимых напитков / С. Н. Кравченко, **Е. С. Миллер**, И. О. Плотникова, А. М. Попов // *Хранение и переработка сельхозсырья*. – 2018. – № 1. – С. 5–10.

6. Кравченко, С. Н. Оптимизация процесса концентрирования экстрактов из плодово-ягодного сырья / С. Н. Кравченко, **Е. С. Миллер**, А. О. Рензев, Д. М. Попов // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. – 2019 – № 4. – С. 82–86.

7. Разработка рецептуры и качественных характеристик продуктов питания на основе злаков / Ю. В. Устинова, Т. В. Шевченко, А. М. Попов, К. Б. Плотников, Е. О. Ермолаева, **Е. С. Миллер** // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. – 2022. – Т. 84. – № 1(91). – С. 43–48. – DOI 10.20914/2310-1202-2022-1-43-48.

### **Материалы международных и российских конгрессов, конференций**

1. Миллер, Е. С. Проблемы смешивания водно-дисперсной системы при производстве сухих гранулированных завтраков на основе молочной сыворотки / **Е. С. Миллер**, Д. В. Доня, Е. Е. Петушкова // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2013. – № 5. – С. 138–139.

2. Миллер, Е. С. Использование связующих материалов при получении структурированных продуктов / **Е. С. Миллер** // *Европейская наука XXI века – 2014: материалы X Международной научно-практической конференции*. – Пшемысль, 2014. – С. 83–85.

3. Миллер, Е. С. Реологические исследования сывороточно-агаровых систем / **Е. С. Миллер**, Е. Е. Петушкова // *Пищевые продукты и здоровье человека: материалы IV Всероссийской конференции с международным участием студентов, аспирантов и молодых ученых / отв. ред. А. Ю. Просеков; ред. кол.: М. А. Осинцева, Е. В. Дмитриева, А. И. Лосева*. – Кемерово, 2011. – С. 275–276.

4. Миллер, Е. С. Связующие компоненты, используемые при получении структурированных продуктов / **Е. С. Миллер** // *Пищевые инновации и биотехнологии: материалы Международной научной конференции / под общ. ред. А. Ю. Просекова; ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности»*. – Кемерово, 2014. – Т. 1. – С. 277–278.

5. Миллер, Е. С. Диагностирование комкуемости при окатывании дисперсной смеси в тарельчатых грануляторах / **Е. С. Миллер** // *Наука и образование: инновации, интеграция и развитие: материалы Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Часть I*. – Уфа: РИО ИЦИПТ, 2014. – С. 191–194.

6. Миллер, Е. С. Особенности использования плодов аронии в производстве киселей / **Е. С. Миллер** // *Актуальные проблемы развития науки и образования: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции (5 мая 2014 г.): в 7 частях. Часть IV*. – Москва: «АР-Консалт», 2014. – С. 37–38.

7. Миллер, Е. С. Оптимизация процесса гранулообразования в тарельчатом грануляторе с активатором / **Е. С. Миллер** // *Пищевые инновации и биотехнологии: материалы IV Международной научной конференции / под общ. ред. М. П. Кирсанова; ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)»*. – Кемерово, 2016. – С. 19–195.

8. Миллер, Е. С. Особенности использования рисовой муки в процессе структурирования производства гранулированных напитков / С. Н. Кравченко, **Е. С. Мил-**

**лер** // Пищевые инновации и биотехнологии: сборник тезисов VII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Том 2. Инженерные технологии / под общ. ред. А. Ю. Просекова; ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет». – Кемерово, 2019. – С. 107–108.

9. Renzyaeva, T. V. Rapeseed processing products as a component of flour-based food for gerontological purpose / T. V. Renzyaeva, A. O. Renzyaev, I. U. Reznichenko, A. M. Popov, S. N. Kravchenko, **E. S. Miller** // International Conference on Production and Processing of Agricultural «Raw Materials – Technology of Processing, Storage and Recycling of Plant Crops». IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 640 (2021) 042004. DOI:10.1088/1755-1315/640/4/042004.

10. Миллер, Е. С. Структурообразующие свойства рисового крахмала в гранулированных киселях / **Е. С. Миллер**, К. Б. Плотников, И. Б. Плотников // Холодильная техника и биотехнологии: сборник тезисов IV Национальной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых; ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет». – Кемерово, 2022. – С. 282–284.

11. Миллер, Е. С. Исследование структурно-механических свойств инстант-напитков / **Е. С. Миллер**, К. Б. Плотников, И. Б. Плотников // Холодильная техника и биотехнологии: сборник тезисов IV Национальной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых; ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет». – Кемерово, 2022. – С. 280–282.

### Патенты

1. Патент РФ № 2491985, МПК В01J 2/14, А23Р 1/02. Тарельчатый гранулятор с активатором: № 2012113847: заявл. 09.04.2012: опубл. 10.09.2013. / **Миллер Е. С.**, Попов А. А., Попов А. М., Сарафанов А. А.; заявитель и патентообладатель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности.

2. Патент РФ № 2583817, МПК В01J 2/14, А23Р 1/02. Тарельчатый смеситель-гранулятор для смешивания многокомпонентных смесей с добавками вязкой жидкости: № 2014141878: заявл. 16.10.2014: опубл. 10.05.2016. / Тихонов В. В., Тихонов Н. В., Тихонова И. Н., Доня Д. В., **Миллер Е. С.**, Попов А. М.; заявитель и патентообладатель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности.

3. Патент РФ № 2608729, МПК А23L2/38. Способ получения инстант-продуктов на основе плодово-ягодных соков, содержащих различные функциональные добавки: № 2014141885: заявл. 16.10.2014: опубл. 23.01.2017. / Тихонов В. В., Тихонов Н. В., Тихонова И. Н., Доня Д. В., **Миллер Е. С.**, Попов А. М.; заявитель и патентообладатель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности.