

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Кемеровский государственный университет»

На правах рукописи

МИЛЛЕР ЕКАТЕРИНА СЕРГЕЕВНА

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

4.3.3. Пищевые системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

доктор технических наук, доцент

Плотников Константин Борисович

Кемерово 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	13
1.1 Основы гранулирования полидисперсных смесей.....	14
1.2 Способы и оборудование для получения гранул окатыванием.....	19
1.3 Пути повышения эффективности работы тарельчатых грануляторов	27
1.3.1 Особенности процесса гранулирования в тарельчатых грануляторах	27
1.3.2 Способы виброожижения сыпучей массы при смешивании и гранулировании	35
1.3.3 Технические решения способов внесения вязкой жидкости в процессе гранулирования	36
1.4 Методы системного подхода к организации технологического потока	40
1.5 Выводы по главе	41
ГЛАВА 2 МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	42
2.1 Объекты исследования	44
2.1.1 Обоснование выбора материала исследования	44
2.1.2 Методология анализа и синтеза технологического потока.....	46
2.1.3 Описание экспериментальной установки и методики проведения исследований.....	48
2.2 Методы исследования	52
2.2.1 Методология определения технологических свойств порошкообразных материалов.....	52
2.2.2 Методология определения прочности гранул	57
2.2.3 Методология определения распадаемости таблеток	60
2.3 Оценка точности измерений.....	62
2.4 Выводы по главе	67
ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА.....	68
3.1 Анализ свойств сырья.....	68

3.2 Совершенствование конструкции тарельчатого гранулятора.....	72
3.3 Анализ факторов, влияющих на процесс гранулирования в смесителе-грануляторе тарельчатого типа	78
3.4 Математические модели и оптимизация процесса	85
3.5 Математическая модель напряжений в зоне работы активатора	88
3.6 Результаты и выводы по главе	95
ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОТОВОГО ПРОДУКТА И ОЦЕНКА РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	96
4.1 Анализ результатов исследований реологических свойств готового продукта	96
4.2 Анализ результатов исследований распадаемости готового продукта	101
4.3 Результаты исследования статической прочности, пористости и истирания гранул.....	104
4.4 Технологическая система получения инстант-напитков	117
4.5 Промышленная реализация и оценка энергетических затрат	124
4.6 Результаты и выводы по главе	126
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	129
ПРИЛОЖЕНИЯ	145
Приложение А. Акт внедрения конструкции.....	146
Приложение Б. Акт внедрения в учебный процесс.....	147
Приложение В. Выборка экспериментальных данных	148
Приложение Г. Патент на изобретение РФ № 2608729	150
Приложение Д. Патент на изобретение РФ № 2583817	151
Приложение Е. Патент на изобретение РФ № 2491985	152

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Проблема правильной организации питания человека является определяющим фактором всего последующего его развития, поэтому имеет не только медицинское, но и большое социальное значение. Качество питания во многом определяет состояние здоровья населения, уровень заболеваемости и смертности. Гармоничное развитие человека обеспечивает сбалансированное рациональное питание, которое отвечает физиологическим потребностям организма, повышает его иммунитет, а также выносливость к различным неблагоприятным факторам окружающей среды [13; 21].

В условиях современной занятости населения не всегда получается соблюдать сбалансированное питание в течение суток. Поэтому актуальным становится использование в ежедневном рационе продуктов, обладающих высокой биологической ценностью, набором макро- и микроэлементов, а также, что не маловажно, и легкостью в приготовлении. Такими продуктами могут выступать различные инстант-продукты, в частности напитки быстрого приготовления [12; 51].

Исходным продуктом при приготовлении инстант-напитков зачастую является плодово-ягодное сырье. Для условий Юга западной Сибири особо актуально использование ягодного сырья, поскольку оно произрастает в Сибирском Федеральном округе в достаточном количестве и его урожай достаточно высок. На основе ягодного сырья возможно получать напитки различного типа, наиболее распространенными из них являются: морсы, кисели, соки и компоты [37].

Напитки на отечественном рынке представлены в жидком концентрированном, а также в сухом порошкообразном виде. Получение таких продуктов в жидком виде является более простым с точки зрения технологии получения. Поскольку отпадает необходимость в нескольких технологических стадиях по сравнению с процессом получения сухих сыпучих продуктов, в

частности, отсутствует стадия, являющаяся наиболее энергоемкой – это стадия сушки. Однако, стоит отметить, что при данном преимуществе все равно продажа инстант-напитков в жидком виде менее распространена по сравнению с сухими продуктами для быстрого приготовления. Это связано с тем, что высушенный продукт обладает более продолжительным сроком хранения, поэтому морсы или компоты продаются в сетевых магазинах с коротким сроком реализации. Транспортирование сухих сыпучих продуктов с экономической точки зрения более выгодно. С целью увеличения пищевой ценности для организма данные инстант-напитки изготавливают многокомпонентными. В этой связи сухие полидисперсные многокомпонентные продукты зачастую подвергают грануляции [39; 40].

Грануляция позволяет повысить сыпучесть продукта и снизить его слеживаемость. Стоит отметить, что гранулированные продукты быстрее подвергаются растворению в рабочей жидкости. При транспортировании многокомпонентных полидисперсных продуктов наблюдается сегрегация продукта, а именно, перераспределение частиц, так что частицы, обладающие меньшей энергией (например, имеющие меньший размер при одинаковой плотности) будут занимать нижнее положение, в то время как частицы с большей энергией займут верхнее положение. В конечном счете это приводит к нестабильному составу получаемого готового продукта, поскольку потребитель просто напросто не сможет равномерно зачерпнуть необходимое количество каждого элемента из смеси. Этот недостаток может быть устранен с помощью производства индивидуальных упаковок для каждой порции напитка, но при этом увеличится расход упаковочного материала, а также нагрузка на предприятия, перерабатывающие непищевые отходы [52].

Гранулированные продукты в пищевой, химической, фармацевтической и смежных отраслях промышленности получают на грануляторах различной конструкции, работающих на разного рода принципах, имеющих свои преимущества и недостатки. При этом некоторые виды гранулирования нашли свое применение в большей степени в определенной отрасли производства. Так, например, можно отметить, что гранулирование в псевдооживленном слое с

подачей связующего или при распылении наиболее часто применяется в фармацевтической промышленности. Данный способ обладает определенными преимуществами, так как в нем можно проводить одновременно сушку, классификацию и грануляцию, что является существенным преимуществом. Гранулы, получаемые по данной методике, обладают высокими значениями сыпучести. Однако стоит отметить, что главным недостатком данной технологии является себестоимость получаемой продукции. В этой связи данный метод получил широкое распространение именно в фармацевтической промышленности. Грануляторы с высокими сдвиговыми усилиями применяются в основном в пищевой и фармацевтической промышленности в малотоннажном производстве. При использовании данной технологии получения продукта используются миксер-грануляторы. Виброгрануляция позволяет ускорить процесс структурообразования гранулированного продукта из полидисперсной смеси сыпучих компонентов и может быть использована совместно с процессом классификации [53].

В агропромышленном комплексе, а также в химической промышленности зачастую используются грануляторы, в которых процесс структурообразования осуществляется окатыванием. Данный способ применяется в тарельчатых и барабанных грануляторах. Способ является достаточно простым в конструктивном плане, однако и имеет ряд недостатков, таких как нестабильный гранулометрический состав и габаритные размеры самих установок [52; 54].

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 значительной степени количество и качество готового продукта зависит от физико-химических свойств составляющих его сырьевых компонентов, способности этих компонентов к межмолекулярному взаимодействию, а также к удержанию влаги в процессе гранулирования и последующей сушки. В качестве сырьевого компонента, отвечающего за структурообразование и влагоудержание,

в традиционной технологии быстрорастворимых киселей используется картофельный крахмал [3].

Согласно литературным данным [3], рисовый крахмал обладает более мелкими размерами по сравнению с картофельным, однако исследований, связанных с определением поведения структурообразования в полидисперсных многокомпонентных смесях, на данный момент не проводилось. Повышение прочности получаемого продукта может быть достигнуто не только за счет конструктивно нового исполнения аппаратного оформления процесса грануляции, но и за счет изменения свойств сырьевых компонентов, что в конечном итоге позволит получить продукт с более высокими показателями качества, в частности статической и динамической прочности, а также сопротивления частиц к истиранию в процессе транспортировки, что уменьшит количество мелкодисперсной фракции.

Продукты, содержащие в своем составе рисовый крахмал, отличаются высокой питательной ценностью, хорошим внешним видом, оказывают благотворное влияние на здоровье человека, регулируют определенные процессы в организме, предотвращают развитие ряда заболеваний и обладают приятным вкусом [64; 65; 66].

Все вышеизложенное позволяет заключить, что применение традиционных способов в совокупности позволит не только интенсифицировать процесс структурообразования многокомпонентных полидисперсных смесей в гранулированном виде, но и получить продукт более высокого качества, в частности получить более стабильный гранулометрический состав и более высокую прочность частиц. Данную задачу возможно решать совместно с использованием подготовленного исходного сырья с определенными структурно-механическими показателями – это является актуальной задачей для пищевых концентратной промышленности. С целью определения уровня развития разработанного метода получения инстант-напитков возможно применение теории технологического потока, разработанной академиком В. А. Панфиловым, которая позволяет определить уровень стабильности и целостности полученной

системы процессов. Системный анализ и синтез исходной и разработанной системы процессов позволяет определить наличие перехода системы из области суммативных систем в стабильную [76–81].

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 рациональные 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;

– определить целостность технологического потока производства гранулированных киселей на основе картофельного и рисового крахмалов, сахарной пудры, концентрата черники и провести сравнительный анализ с исходной линией, используя методику системного анализа и синтеза;

– провести опытно-промышленные испытания смесителя-гранулятора в составе линии производства инстант-напитков и оценить экономический эффект.

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 среднемодальным 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 и удельные энергозатраты 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 энергозатраты 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 Кемеровском государственном университете 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 среднемодального значения размера гранул и затрат мощности при различных режимно-технологических параметрах;
- математическая модель, описывающая напряжение, действующее 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); 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); IV Международной научной конференции «Пищевые инновации и биотехнологии» (Кемерово, 2016); 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, в том числе одна статья 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 153 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.

ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В современном мире пищевая промышленность решает задачи интенсификации технологических процессов и производств при сохранении высокого качества готового продукта, что обуславливает развитие, разработку новых и совершенствование известных физических способов преобразования продуктов. Наряду с этим стоит принять во внимание, что современный уклад жизни приводит к тому, что у населения не получается соблюдать сбалансированный рацион питания. Для целей удовлетворения организма полезными веществами можно прибегать к разработке продуктов повышенной биологической ценности. Также стоит учесть и традиции населения в кулинарии. Для сибирских условий характерно употребление в пищу большого количества ягодного сырья, как в твердом, так и в жидком виде. Ягоды являются кладью полезных веществ. Наиболее простым способом наполнения организма полезными веществами для потребителя является употребление ягодного сырья в виде различных морсов, компотов, киселей, смузи и т. д. Эти продукты могут быть представлены как в сухом, так и жидком виде. Данные продукты в жидком виде обладают меньшим сроком хранения, при этом расходы на их транспортировку увеличиваются по сравнению с расходами на транспортировку сухих порошкообразных продуктов. Поэтому инстант-напитки являются более актуальным видом продукта по сравнению с уже готовыми напитками [87; 89].

Напитки в порошкообразном виде зачастую являются многокомпонентными. Компоненты в смеси обладают различной плотностью и размерами частиц. При транспортировке в результате воздействия вибрации возможно возникновение процесса сегрегации, при котором происходит перераспределение частиц смеси в зависимости от их плотности и размеров, так частицы, обладающие меньшей потенциальной энергией, оказываются в нижней части, а крупные частицы занимают верхнее положение. В конечном счете это приводит к тому, что потребитель не сможет получить продукт с необходимыми пропорциями каждого

элемента. Это, конечно же, снижает привлекательность продукта, с точки зрения покупателей. Для того, чтобы предотвратить это, применяют грануляцию многокомпонентных полидисперсных порошкообразных продуктов. Гранулированные продукты обладают повышенной сыпучестью, не склонны к слипанию, скорость их распадаемости и растворения выше, чем у порошков, и в них уже в определенной пропорции заложены компоненты смеси [91; 92].

Среди мировых лидеров в области производства инстантированных продуктов в гранулированном виде можно отметить следующие компании: Niro-Atomizer, ICF & Welko, Nestle и т. д.

Получение продуктов в гранулированном виде отражено в большом количестве научных трудов как отечественных, так и зарубежных ученых. Однако в настоящее время продолжают научно-исследовательские и конструкторские разработки в данной области, особенно стоит отметить актуальность совместного применения нескольких способов структурообразования, что позволяет минимизировать недостатки каждого из них [17; 104; 126; 127].

1.1 Основы гранулирования полидисперсных смесей

Гранула (от лат. *Grānulum* – зернышко) – отдельный элемент комбинированных сухих сыпучих веществ и смесей или отдельных твёрдых дозированных и не дозированных субстратов, спрессованных в виде крупинок шарообразной, неправильной кубической или цилиндрической формы. Гранулы возможно получать различными способами в зависимости от свойств исходного сырья и требуемых параметров готовой продукции. Для чего применяют уплотнение порошкообразного продукта, при этом могут применяться дополнительно связующие вещества, но возможно структурообразование и без них.

Диспергирование жидкого продукта с последующей кристаллизацией также позволяет получать гранулы. Размеры получаемых гранул напрямую зависят от

свойств исходного сырья и методов структурообразования, их величина может варьироваться от 0,2 до 25 мм. Согласно П. Г. Классену, существует классификация способов и методов гранулообразования полидисперсных продуктов, которая представлена в таблице 1.1.

Одним из последних разработанных методов является гранулирование в жидкой среде, также известный как ГЖС. Данный метод основан на разной величине смачиваемости твердых частиц смеси в полярных и неполярных жидкостях [43].

Гранулированный продукт, получаемый по одной из перечисленных технологий, обладает рядом преимуществ по сравнению с порошкообразными материалами: он обладает меньшей насыпной плотностью, лучшей текучестью при наложении нагрузки, мелкодисперсная фракция не пылит, гранулы легче дозировать в технологическом потоке. Поэтому метод гранулирования стал использоваться практически во всех отраслях промышленности.

Развитие аппаратного оформления процесса структурообразования гранулированного продукта напрямую связано с технологией получения продукта, где оно применяется, поэтому выбор способа получения гранулята напрямую зависит от наименования конкретного производства. Свойства исходного сырья и его агрегатное состояние оказывают влияние на подбор принципиальных подходов к выбору наиболее рационального метода структурообразования [45; 48].

При работе с сыпучими продуктами сталкиваются с *дисперсионной средой*, которая состоит из вещества, распределенного в среде другого, при этом четко наблюдается граница раздела фаз. Дисперсные системы состоят из дисперсной фазы и дисперсионной среды, в которой она находится. Дисперсная фаза представлена частицами сухого вещества, а дисперсионная среда представляет собой материальный объект для дисперсной фазы.

Таблица 1.1 – Классификации методов гранулирования [41]

Признак	Способ
По виду гранулируемого материала бывают процессы гранулирования	Кристаллизация при распылении раствора
	Прессовый способ под избыточным давлением или дробление продукта крупного размера до размера гранул
	Окатывание полидисперсной смеси при добавлении жидкого связующего, с последующим удалением влаги и упрочнением связей
	Конденсация (десублимация) из газообразной фазы, в результате которой образуются гранулы
	Химический способ, заключающийся во взаимодействии смеси жидкой и газообразной фаз
	Химический способ, заключающийся во взаимодействии смеси жидкой, твердой и газообразной фаз
По образованию гранул	Единовременно без изменения геометрических размеров гранул во времени
	Образование гранул, сопровождающееся изменением их размеров во времени
	Образование гранул одновременно с ростом уже образованных гранул
По механизму гранулообразования	Способ окатывания в результате перемещения зародыша гранулы по частицам меньшего размера
	Способ распыления жидкости в свободный объем или нейтральную среду, с последующей кристаллизацией по мере удаления влаги
	Способ прессования под избыточным давлением, к которому относятся таблетирование, брикетирование и экструдирование
	Распыление исходного материала на уже готовые поверхности частиц во взвешенном состоянии потока газа
	Чешуирование, заключающееся в охлаждении жидкости на инородной поверхности

Характеристики дисперсных сред представлены на рисунке 1.1. При этом раздробленные частицы, находящиеся в дисперсионной среде, могут иметь различные формы (пленки, нити, суспензии). Тела характеризуются рядом параметров, таких как дисперсность и степень дисперсности, удельная поверхность и кривизна поверхности. В свою очередь, дисперсионная среда, характеризуется в основном двумя показателями – это дисперсность и прерывистость [42].

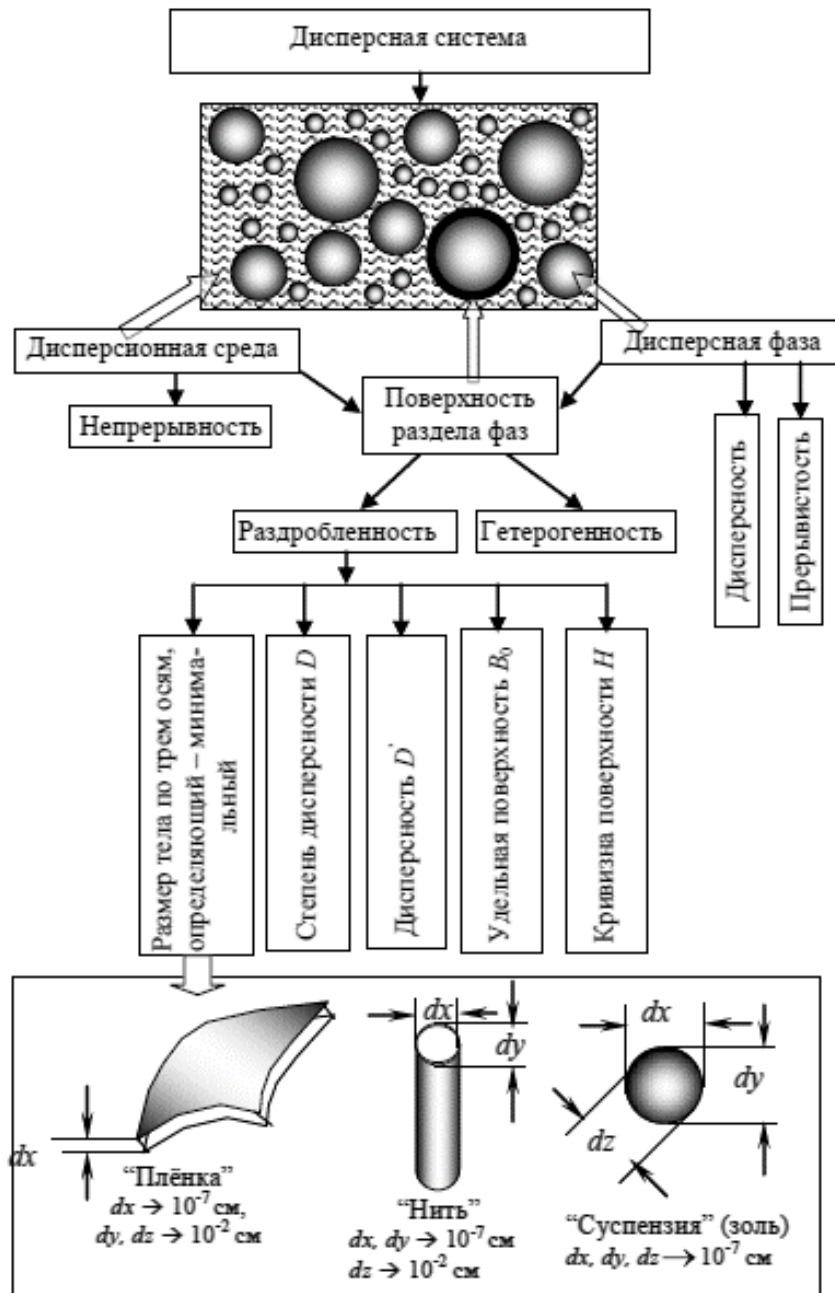


Рисунок 1.1 – Характеристики дисперсных систем

Дисперсные системы разнообразны по своим свойствам и природе, хотя они обладают рядом схожих показателей, по которым они могут быть классифицированы. Согласно литературным данным [115; 116] дисперсные системы классифицируются по дисперсности, структуре, агрегатному состоянию. Полная классификация дисперсных систем представлена на рисунке 1.2.

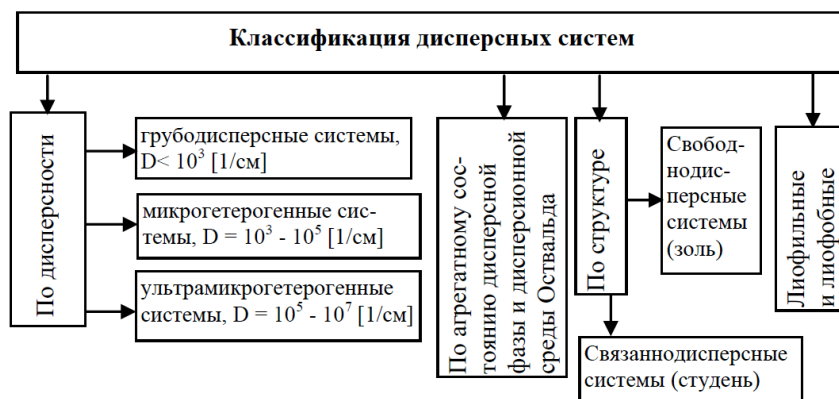


Рисунок 1.2 – Классификация дисперсных систем

Структуры дисперсных систем подразделяются на: свободные (золи), в которых наблюдается свободное перемещение одной фазы относительно другой, связанные (студни и композиты), которым присуще жесткое соединение частиц в единую структурированную систему [131].

Удельная поверхность частиц играет одну из главных ролей при образовании гранулированных продуктов, так при снижении размеров частиц менее 0,5 мкм наблюдается их гидрофобность, что затрудняет процесс структурообразования. Классификация дисперсных систем в зависимости от размеров частиц представлена в виде графической зависимости на рисунке 1.3 [129].

В. Оствальдом была предложена классификация дисперсной фазы и дисперсионной среды по агрегатному состоянию. Согласно данной классификации в зависимости от агрегатного состояния двух или более сред системы подразделялись на семь подсистем, отличающихся своими свойствами: аэрозоли; газовые эмульсии и пены; эмульсии; лиозоли и суспензии; твердые пены; твердые эмульсии; твердые золи [88].

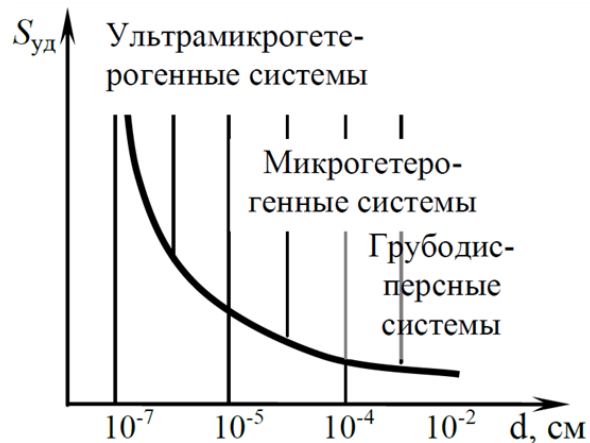


Рисунок 1.3 – Зависимость величины удельной поверхности от размеров частиц

Согласно трудам Г. Фрейдлиха, дисперсные системы, в которых участвует жидкая среда, можно разделить на лиофильные системы (возможно взаимодействие дисперсной фазы и дисперсионной среды между собой; при определенных условиях первая может быть растворена во второй) и лиофобные системы (не наблюдается взаимодействия между системами и растворения дисперсной фазы в дисперсионной среде) [90].

Сами дисперсные системы получают *диспергированием* (раздробление тела до коллоидного состояния) и *конденсацией* (укрупнение частиц, атомов, молекул до частиц коллоидных размеров – химическая реакция с образованием осадка) [128].

1.2 Способы и оборудование для получения гранул окатыванием

В современных условиях высокой конкуренции, сложившейся не только в пищевой, но и других отраслях промышленности, наблюдается совершенствование аппаратного оформления процесса структурообразования гранулированных продуктов из многокомпонентных полидисперсных смесей. Совершенствование технологии приводит к повышению качества готовой

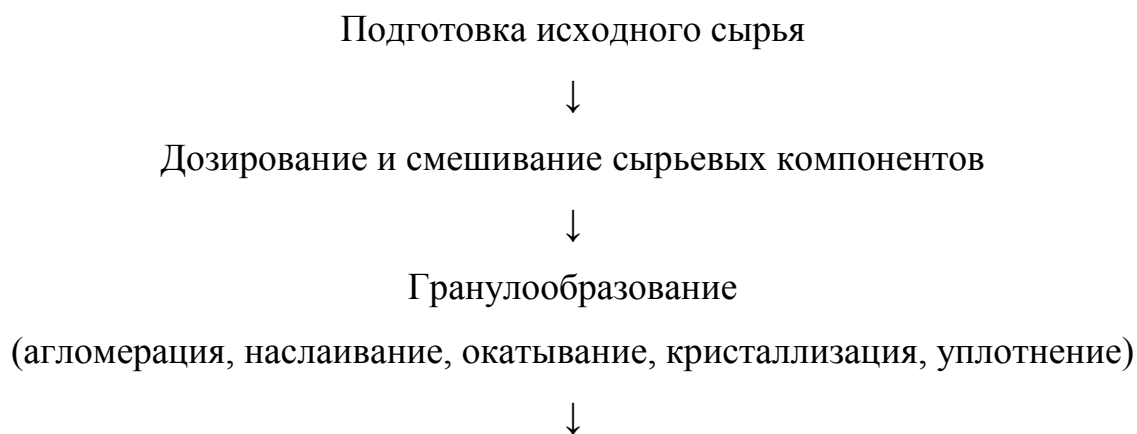
продукции, а также к эффективности производства в целом, что в конечном итоге повышает конкурентоспособность разработанной технологии. К готовой продукции может быть предъявлен ряд требований по таким показателям, как рассыпчатость, прочность гранул, гранулометрический состав, слеживаемость, пылимость – эти требования зачастую могут быть удовлетворены существующим оборудованием, представленным на рынке, однако при ужесточении этих значений приходится изыскивать новые способы и методы гранулирования для достижения поставленной цели [5].

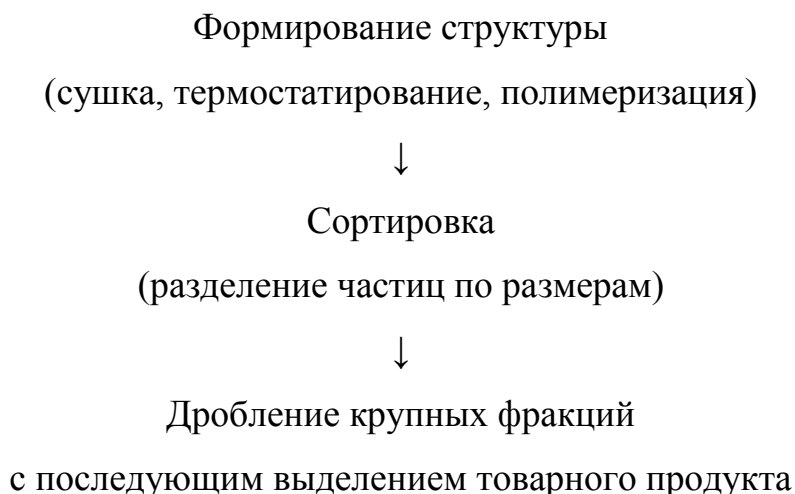
Выбор способа гранулирования и его аппаратного оформления зависит от многих факторов, наиболее весомыми из них являются: особенности отрасли, где будет внедряться данная единица оборудования, доступность данного оборудования, уровень квалификации персонала, научная база по гранулированию определенного сырья, технико-экономическое обоснование [85; 86].

При большом разнообразии технологического оборудования, позволяющего проводить процесс структурообразования, все же можно выделить «базовые» единицы для осуществления соответствующих способов [90; 95]:

- при окатывании – барабанный и тарельчатый (чашевый) грануляторы;
- при диспергировании – распылительные устройства;
- при прессовании – различные конструкции прессов;
- при продавливании – вальцы и экструдеры;
- при ГЖС – смесители жидкостные.

Гранулирование в общем виде определяется такими основными технологическими стадиями:





Однако собственно стадия гранулообразования, определяющая выбор методов гранулирования и их аппаратного оформления, играет особую роль в системе процессов гранулирования.

Существуют и другие виды грануляторов, используемых на предприятиях, однако они являются лишь модификациями основных единиц, рассмотренных ранее, или они могут совмещать в себе принцип работы этих машин [59; 138; 139].

Грануляторы, которые основаны на принципе продавливания (экструзии) с помощью валцов, шнеков или иных рабочих органов, имеют ряд преимуществ по сравнению с остальными – это стабильный гранулометрический состав готовой продукции, повышенная прочность гранулята, малые габаритные размеры установки. Однако при явных преимуществах имеются и недостатки, не позволяющие их использовать для любых продуктов. К недостатку данного метода можно отнести: в первую очередь, это нагрев продукта в предматричной зоне и зоне экструзии, что приводит к разрушению термолабильных элементов при их наличии в продукте. Снизить температуру возможно за счет установки дополнительной рубашки и введения хладоносителя, что усложняет конструкцию. Еще одним недостатком можно назвать наличие трещин в готовой продукции, для недопущения используют различные зоны релаксации как в шнеке, так и в зоне экструзии, что также усложняет конструкцию. Стоит также отметить процесс резкого перехода жидкости в газообразное состояние при выходе продукта из экструдера за счет большой разницы давления внутри рабочей зоны и

атмосферным давлением. В настоящее время данные грануляторы активно используются в АПК и получении брикетов при коксовании [30; 112].

Гранулирование в псевдокипящем слое весьма эффективно, оно позволяет получать стабильный гранулометрический состав, возможно добавление связующих с целью получения гранул требуемого размера. В данных грануляторах возможно проведение процесса сушки, грануляции и классификации, что является существенным преимуществом, согласно литературным данным [144], поскольку оно отвечает требованию агрегатирования. Однако данный способ является весьма дорогим за счет больших гидравлических сопротивлений, поэтому распространение данные грануляторы получили в основном в фармацевтической промышленности.

Наиболее простыми среди перечисленных грануляторов являются тарельчатые и барабанные. Они нашли широкое распространение не только в пищевой, но и других отраслях промышленности в силу простого аппаратного оформления процесса и быстрого регулирования. На данный момент так как эти единицы оборудования являются наиболее актуальными, они имеют большое количество модификаций, повышающих их эффективность [71; 120].

При сравнении тарельчатых и барабанных грануляторов можно сделать вывод, что последние хоть и имеют большую производительность при непрерывном производстве, для них характерны большие габаритные размеры, а переход с одного продукта на другой требует большего времени подготовки.

При проведении процесса окатывания гранул в данных машинах наблюдается следующее различие, а именно: в барабанном стадии формирования происходят последовательно по длине барабана, а в тарельчатом наблюдается наложение зон гранулообразования. Для тарельчатых грануляторов характерна большая чувствительность к колебаниям режимных параметров и свойств исходного сырья. При сравнении удельной производительности тарельчатые грануляторы являются перспективными по сравнению с барабанными [75].

Способы получения гранул окатыванием полидисперсных многокомпонентных систем схожи между собой, однако можно выделить три основные [94].

Первый способ подразумевает подачу исходного сырья в гранулятор с уже доведенной влажностью для начала процесса структурообразования, т. е. связующий раствор подается еще на стадии смешения, где происходит доведение влажности до оптимальных значений. Данный способ применим особенно при гранулировании тонкодисперсных систем, которые являются малорастворимыми или нерастворимыми в дисперсионной среде. Скорость гранулообразования при использовании данного метода весьма высока, поскольку продукт уже подается с оптимальной влажностью, однако стабильность плотности распределения получаемого гранулята не высока, поскольку может наблюдаться неравномерность содержания влаги по слою материала.

Второй способ гранулирования заключается в подаче сухой многокомпонентной полидисперсной смеси в гранулятор. Связующий раствор подается непосредственно на продукт, находящийся в грануляторе с последующим увлажнением исходного сырья, образованием зародышей и впоследствии устойчивых гранул. Данный способ позволяет осуществлять более точное регулирование процесса гранулирования за счет изменения подачи связующего раствора, однако он имеет ряд недостатков, а именно: наблюдается низкая скорость проведения процесса структурообразования в полидисперсных смесях, что является следствием проведения процесса смачивания непосредственно в грануляторе, также стоит отметить наличие процесса сегрегации, которая происходит за счет разности размеров частиц, что в итоге может привести к нестабильному гранулометрическому составу [121].

Третий способ является промежуточным между двумя описанными ранее. «Полумокрый» метод гранулирования заключается в подаче продукта в машину с влажностью, доведенной до 70–80% от оптимальных значений, а оставшийся объем связующего раствора подают непосредственно в оборудование во время процесса структурообразования. Данный способ обладает высокой

производительностью, а его регулирование достаточно точное, что позволяет судить о перспективности данного метода.

По завершению процесса грануляции производят классификацию полученного продукта по размерам частиц на вибрационных ситах. Частицы, размеры которых не попадают в поле допуска, возвращаются в технологическую линию и вновь подвергаются гранулированию [134; 141].

Процесс уплотнения влажной массы наблюдается как на стадии зародышеобразования, так и на стадии окатывания гранулы. Агломераты, которые подверглись большему уплотнению способствуют более быстрому образованию зародышей и в последствии гранул, при этом наблюдается более равномерная структура. В этом смысле - кинетика и механизм уплотнения влажного дисперсного материала определяют и механизм гранулирования в целом [105; 107].

На скорость и поведение процесса структурообразования также существенное влияние оказывает зародышеобразование гранул. При проведении сухого способа грануляции в машинах тарельчатого или барабанного типа наблюдается снижение скорости проведения процесса в силу того, что связующий раствор подается на сухой гидрофобный дисперсный материал. Прочность влажных гранул при этом будет не высока, что будет приводить к их разрушению и образованию заново. Это в конечном итоге приводит к увеличению времени грануляции и эффективности процесса в целом. Аналогичный эффект может наблюдаться при недостаточном количестве связующего раствора в зоне соприкосновения частиц, т. е. не будет происходить образование жидкостных мостиков. На эти процессы оказывают существенное влияние структурно-механические свойства дисперсной фазы, которая подвергается гранулированию [111; 124; 140].

Учитывая вышесказанное, можно заключить, что применение способа окатывания при получении многокомпонентных полидисперсных инстант-напитков в гранулированном виде является перспективным в силу того, что данный способ позволяет получать гранулы с заданными показателями пористости, прочности. Получаемый гранулы приобретает новые свойства, не присущие элементам, по отдельности входящим в систему, поскольку новая

система обладает макро- и микрокапиллярной структурой, легче поддается увлажнению с последующим распадом и растворением. Гранулированный продукт меньше подвергается слеживанию и обладает большей насыпной массой, чем гранулы, полученные другими видами гранулирования. Все модернизации, проводимые для данных единиц оборудования, зачастую направлены на устранение основных недостатков – это увеличение скорости зародышеобразования и повышение плотности распределения размеров получаемых гранул.

Гранулирование многокомпонентных полидисперсных материалов методом окатывания заключается в превращении сухих исходных компонентов или влажной бесформенно агрегированной дисперсной системы в частицы одинакового размера, плотности и пористости за счет подачи связующего раствора. Гранулы, полученные таким способом, отличаются правильной сферической формой. Идея гранулирования методом окатывания впервые была предложена в 1912 году в Швеции Андерсеном. В процессе гранулирования в сухую смесь сыпучих компонентов подается связующий раствор, в результате взаимодействия между собой твердой и жидкой фаз происходит образование жидкостных мостиков (рисунок 1.4), сила сцепления которых не дает распасться образованным агломератам. В последствии происходит кристаллизация, а жидкостные мостики становятся прочнее, и в результате сушки образуется готовая гранула [1; 14; 15].

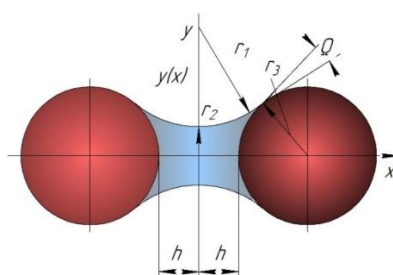

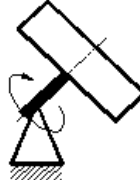


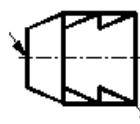
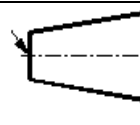

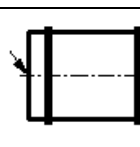


Рисунок 1.4 – Жидкостный мостик

Барабанные и тарельчатые грануляторы могут различаться по форме обечайки согласно представленной классификации в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Классификация грануляторов-окатывателей

Грануляторы-смесители	Чашевые	Непрерывного действия	Ступенчатые	
			Тарельчатые	
			Сферические	
		Периодического действия	Эллипсоидные	
Грануляторы-смесители	Барабанные	Непрерывного действия	Многоконусные	
			Конусные	
			Цилиндрические с наклонной осью	
		Периодического действия	Цилиндрические с горизонтальной осью	

Большинство авторов [7; 13; 31; 35; 117; 123] отмечают, что тарельчатые грануляторы позволяют в значительно более широких диапазонах регулировать размеры и прочность гранул. Кроме того, тарельчатые грануляторы конструктивно проще и надежнее барабанных в эксплуатации.

1.3 Пути повышения эффективности работы тарельчатых грануляторов

1.3.1 Особенности процесса гранулирования в тарельчатых грануляторах

Согласно литературным данным [10; 11; 18; 132] и на основе анализа структурно-механических процессов структурообразования, явлений коалесценции и переноса влаги из центра гранулы к ее периферии, была предложена модернизация тарельчатых грануляторов, заключающаяся в установке активатора. Он представляет собой вал с лопастями различной формы, которые помещались в слой дисперсного материала для создания высоких сдвиговых усилий, аналогичных миксерам-грануляторам. В результате соударения частиц о рабочий орган и между собой наблюдалось увеличение скорости зародышеобразования, а получаемые частицы отличались повышенной плотностью и прочностью.

Наиболее простым представителем грануляторов такой конструкции является машина следующей конструкции [89]. Гранулятор (рисунок 1.5) представляет собой наклонную тарель, в рабочей зоне которой установлен активатор, который представляет собой вертикальный вал с лопастями. Крутящий момент вал активатора получал от двигателя постоянного тока. Частота вращения мешалки регулировалась [58].

Активатор устанавливается в зоне, где наблюдается процесс сегрегации частиц, при котором гранулы большего размера занимают верхнее положение, а частицы меньшего размера как бы подсыпаются под них – это снижает эффективность работы гранулятора. Активатор предусматривает разрушение частиц большего размера и уплотнение с последующим увеличением частиц меньшего размера, на этом принципе работают миксер-грануляторы. Согласно работам [63] были установлены рациональные размеры активатора определенной формы, также было установлено оптимальное соотношение диаметра активатора

и тарели, которые находились в диапазоне 1:8–1:18. Такой широкий диапазон объясняется широким варьированием свойств исходного сырья.

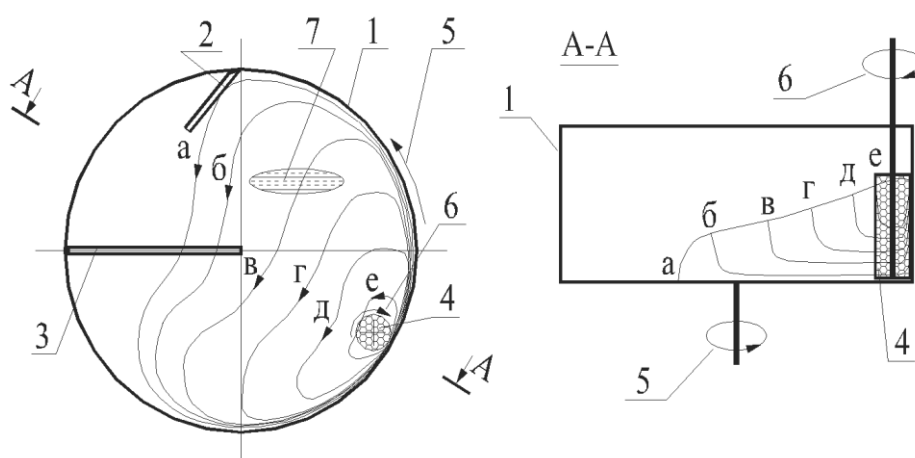


Рисунок 1.5 – Схема гранулятора с активатором, с нанесенными линиями тока гранул: 1 – тарель, 2 – отбойный нож; 3 – донный нож; 4 – зона захвата активатора; 5 – направление вращения тарели; 6 – направление вращения активатора гранул по мере их роста; 7 – зона распыления жидкости: а – линия тока исходного материала; б, в, г, д – линии тока гранул по мере их роста; е – линия тока самых крупных гранул

Активатор позволяет достаточно гибко регулировать процесс структурообразования гранул из полидисперсной многокомпонентной смеси. Меняя формы активатора и его геометрические размеры, можно подобрать оптимальные для достижения необходимых свойств готовой продукции в зависимости от параметров исходных компонентов. Плотность гранулы по ее сечению не однородна; так, наблюдается ее снижение у крайних слоев. Сила удара может позволить перераспределить плотность по сечению гранулы и регулировать ее геометрические размеры.

На рисунке 1.5 показаны траектории движения дисперсного материала по тарели в сечении гранулятора и виде сверху. Активатор установлен в зоне линии тока самых крупных гранул на расстоянии от дна и внутренней поверхности тарели от 5 до 10 мм. Место установки на виде сверху соответствует промежутку

от 300 до 360° при условии вращения тарели против часовой стрелки согласно схеме [93].

Согласно рисунку 1.5 в грануляторе присутствует шесть линий тока частиц, отличающихся своими размерами: а – линия тока дисперсной смеси; б, в, г, д – линии тока гранул по мере их роста; е – линия тока самых крупных гранул. Гранулят под действием силы тяжести начинает перемешаться по наклонной тарели, а в результате наложения движения тарели и центробежной силы траектория движения частиц имеет сложный характер.

Связующий раствор подается через форсунки на слой сыпучего материала, тем самым увлажняя его. Материал, который в силу высоких адгезионных свойств налипает на внутреннюю поверхность тарели и дно установки, счищается с помощью пристенного и донного ножей (2) и (3) соответственно. По мере роста гранулы перемещаются из одной зоны в другую, пока не достигнут зоны е, где происходит их разрушение и перераспределение.

Грануляция окатыванием с применением активаторов различной конструкции имеет следующие преимущества:

- повышение плотности распределения гранул по их размерам, что снижает затраты энергии на повторное возвращение несгранулированного материала в зону структурообразования;
- время гранулирования в установках, снабженных активатором и без него, сокращается в среднем в 3–5 раз.

Скорость процесса структурообразования напрямую зависит от насыпной массы исходного сырья, при ее снижении наблюдается ее резкий рост. Также стоит отметить, что при гранулировании продуктов, имеющих существенную разницу в дисперсном составе, применение активатора также значительно повышает скорость образования зародышей агломератов [20; 24].

Согласно литературным данным [25; 36; 49] в начальный период времени в процессе подачи связующего раствора могут образовываться агломераты неправильной формы, обладающие крупными размерами, в этой связи активатор

позволяет за счет больших сдвиговых усилий разрушать данные агломераты на более мелкие с последующей грануляцией в сферическую форму окатыванием.

Существует изобретение за номером № 2105601 – тарельчатый гранулятор, представленный на рисунке 1.6. Тарельчатый гранулятор состоит из следующих конструктивных элементов: 1 – тарель, наклоненная к горизонтальной плоскости; 2 – корпус; 3 – крышка; 4 – разгрузочный патрубок; 5 – патрубок для подачи материала; 6 – форсунка для подачи связующего раствора; 7 – пластина для регулирования слоев; 8 – нож; 9 – стойка; 10 – сепарирующее устройство; 11 – нож; 12–16 рабочие зоны.

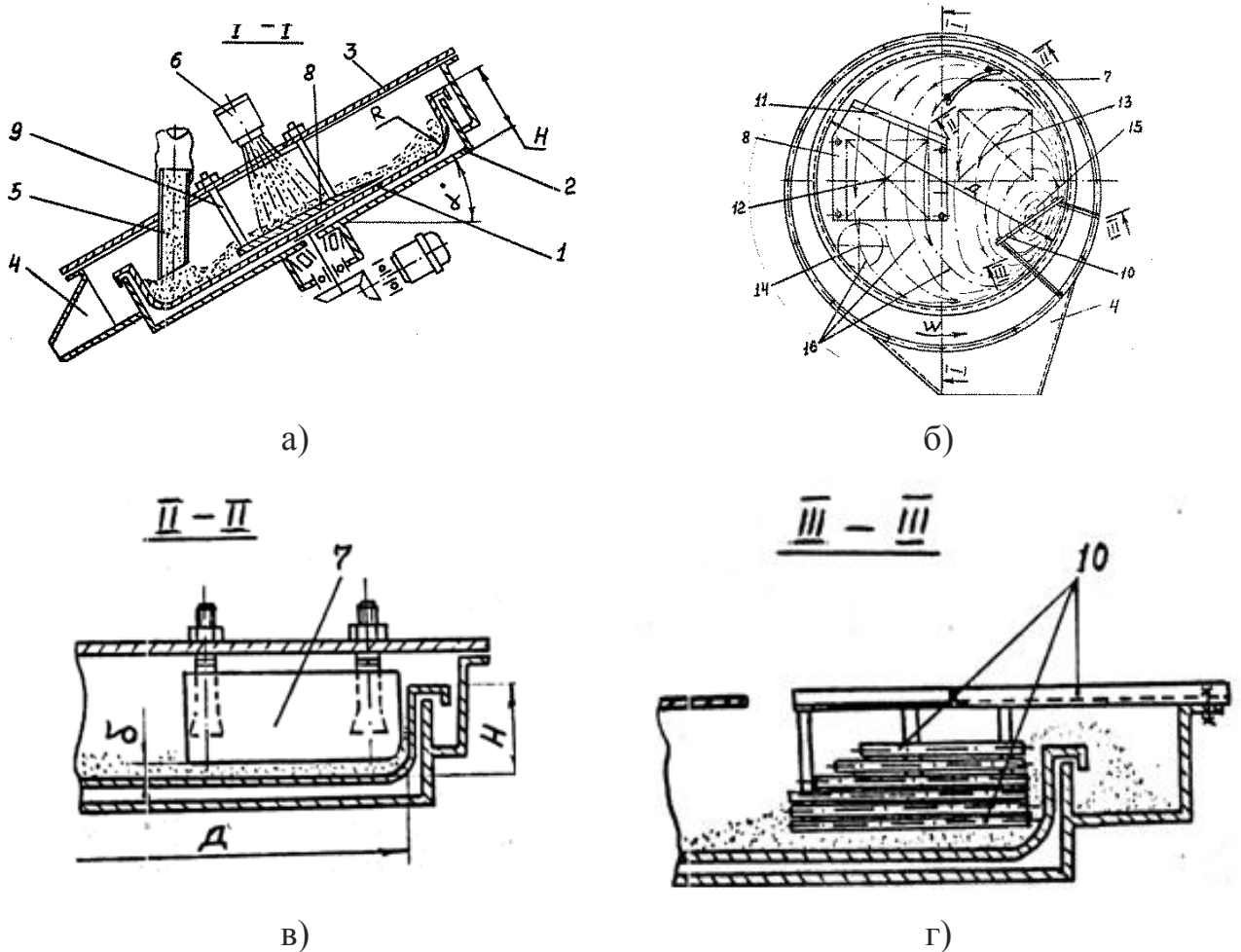


Рисунок 1.6 – Тарельчатый гранулятор: а) общий вид, разрез I-I; б) вид сверху; в) регулирующая пластина, разрез II-II; г) сепарирующее устройство, разрез III-III

Установка для гранулирования полидисперсного продукта работает следующим образом. Тарель получает вращательное движение от привода через зубчатую коническую передачу. Через загрузочный патрубок в зону (14) вводится исходное сырье для дальнейшего гранулирования. На агломераты действует несколько сил (силы тяжести, центробежной и силы трения), что создает сложное движение, представленное линией (16). Траектория движения сконцентрирована вокруг зоны сегрегации (15). В процессе вращения тарели гранулы поднимаются в верхнее положение. В тот момент, когда сила тяжести превышает силу трения, происходит скатывание гранулы по дисперсной фазе, в результате чего происходит увеличение агломерата и придание ему правильной сферической формы. Часть гранул при скатывании по тарели отражается от пластины (7), а часть проходит под ней.

На агломерированные частицы, которые скатываются по наклонной тарели и отражаются о пластину, происходит напыление связующего раствора через форсунки (6). Распыление связующего раствора происходит в зоне (13). Гранулы, прошедшие через зазор между пластиной (7) и дном тарели (1), счищаются лезвием (11) стола-ножа (8), скользящим по дну тарели навстречу движению гранул, и подаются на стол-нож (8), закрепленный на крышке (3) на стойках (9). Перекатываясь по столу-ножу (8), гранулы подвергаются напылению через форсунки (6), находящиеся в зоне (12).

Разгрузка гранул требуемого размера производится через патрубок (4) за счет центробежной силы. С целью классификации получаемого гранулята используется сепарирующее устройство, которое позволяет удалять гранулы менее 2,5–3 мм. Сепаратор представляет собой два параллельных прутка гребенки. Те гранулы, которые прошли сепарирующее устройство, вновь поднимаются по тарели, и цикл повторяется до достижения ими определенного размера.

Данное конструкторское решение имеет ряд недостатков, а именно: длительность процесса структурообразования в связи с длительным процессом зародышеобразования.

Согласно патенту № 2170137 предложено новое аппаратное оформление процесса структурообразования в тарельчатом грануляторе, изображенном на рисунке 1.7.

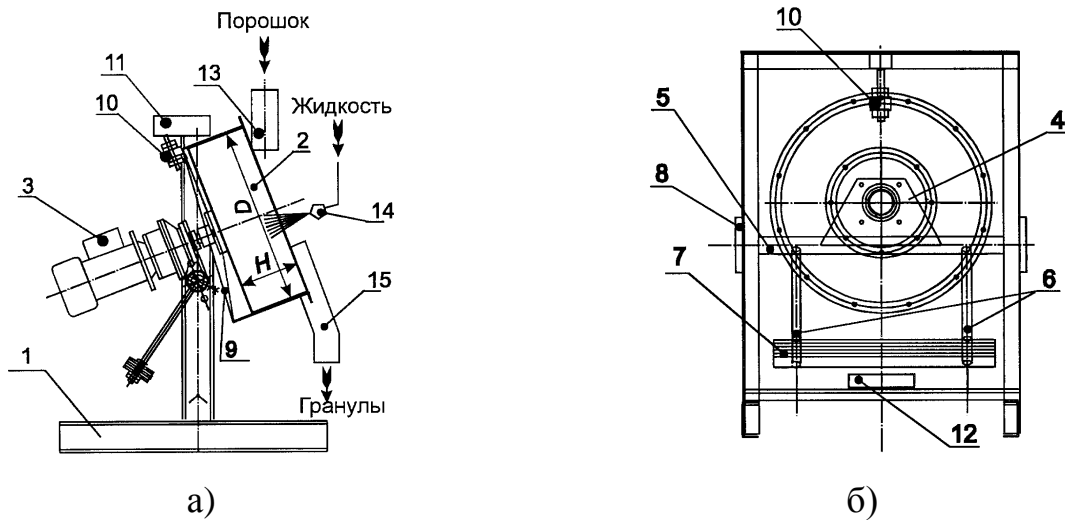


Рисунок 1.7 – Тарельчатый гранулятор:

1 – рама; 2 – тарель; 3 – электропривод; 4 – кронштейн; 5 – поворотная ось;
 6 – стержень; 7 – противовес; 8 – подшипники качения; 9 – кулачковый механизм; 10 – роликовый толкатель; 11 – кронштейн; 12 – толкатель;
 13 – патрубок подачи сырья; 14 – распылительные форсунки; 15 – патрубок разгрузки гранулятора

Через патрубок (13) исходное сырье подается на вращающуюся от электропривода (3) тарель (2). За счет контакта электромагнитного толкателя с кулачком тарель поворачивается вокруг оси (5). В результате такого контакта происходит вращение и качение рабочей чаши от единого привода, что исключает необходимость установки дополнительного привода для совершения маятникового качания. Колебательные движения тарели вместе с приводом совершаются относительно рамы, на которой она установлена в подшипниковых узлах (8). Частота и амплитуда колебаний регулируются за счет установки противовесов различного значения.

С целью компенсации потерь энергии маятника на трение в подшипниковых узлах и о воздух предусмотрен электромагнитный механизм спуска (12), который способен сообщать импульс маятнику. После подачи сыпучих компонентов на тарель подается связующий раствор через распылительные форсунки (14). В результате этого происходит увлажнение сыпучего материала с последующим образованием зародышей гранул и агрегатов. Далее за счет вращения тарели частицы перемещаются в верхнее положение, откуда они скатываются по слою дисперсного материала, тем самым увеличиваясь в размерах. Скорость процесса гранулирования в машине данного типа зависит от скорости вращения тарели и угла ее наклона к горизонтальной плоскости, а также внутреннего трения продукта в слое материала. Последний параметр позволяет снизить создание маятникового движения в дополнение к вращению чаши.

Гранулятор данной конструкции позволяет совершать сложное движение частиц с целью снижения времени гранулирования, однако плотность гранулометрического состава при использовании данного метода не высока, что приводит к дополнительным затратам на возвращение продукта на стадию структурообразования.

Известна конструкция тарельчатого гранулятора с активатором (патент № 28808). Тарельчатый гранулятор с активатором работает следующим образом. Исходная смесь сыпучих компонентов подается через загрузочный патрубок на тарель гранулятора. Тарель получает вращательное движение от привода через зубчатую коническую передачу. Затем происходит подача связующего раствора через форсунки на поверхность дисперсного материала, в результате чего последний увлажняется, и происходит образование зародышей гранул.

При налипании материала на внутреннюю поверхность корпуса тарели или ее дно он срезается с помощью пристенного или донного ножей соответственно. Частицы, по мере увеличения в размерах, перемещаются в зону, где расположен активатор, представляющий собой мешалку с лопастями сложной формы. При взаимодействии лопастей активатора с вновь образованными гранулами

происходит их уплотнение и дробление гранул больших размеров на более мелкие, затем процесс повторяется циклично до момента, когда большая часть дисперсного материала не перейдет в структурированный вид, после этого производится разгрузка через патрубок (5) с последующей классификацией гранул. Гранулы меньшего или большего размеров, по сравнению с заданными, возвращаются на стадию структурообразования.

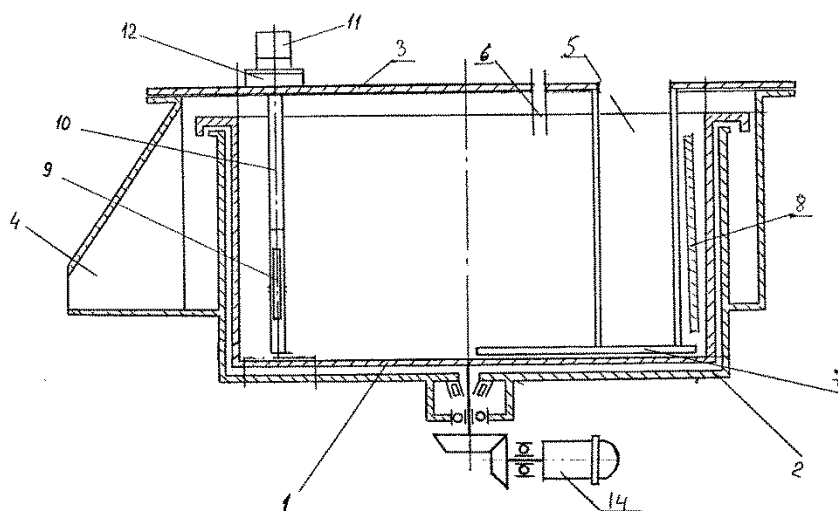


Рисунок 1.8 – Тарельчатый гранулятор с активатором:

- 1 – тарель; 2 – корпус; 3 – крышка; 4 – разгрузочный патрубок; 5 – загрузочный патрубок; 6 – распылительная форсунка; 7, 8 – донный и пристенный ножи; 10 активатор; 11 – привод; 12 – подшипниковый узел; 13 – привод тарели

К достоинству данного гранулятора можно отнести прочность получаемых гранул и минимизацию частиц, превышающих лимитирующие значения, за счет установки активатора. Однако данная конструкция имеет недостатки в виде нестабильного гранулометрического состава и длительности времени зародышеобразования.

1.3.2 Способы виброоживления сыпучей массы при смешивании и гранулировании

Согласно представленным результатам работ [4; 6; 9; 28; 29; 133; 142] можно сделать вывод, что применение интенсификации процесса зародышеобразования в виде подвода динамической нагрузки является актуальным направлением, хотя и является недостаточно изученным с точки зрения комплексного способа структурообразования гранулированного многокомпонентного полидисперсного инстант-продукта. В работе [143] указывается, что при значении давления, равном 5 МПа, происходит пластическая деформация – это, в конечном счете, приводит к повышению скорости агломерирования частиц.

Перевод дисперсной среды в виброоживленный или виброкипящий слой позволяет увеличить контакт частиц между собой или трение их о рабочие органы машины, что позволяет увеличить скорость самого трудного этапа в структурообразовании – это появления зародышей гранул [56; 60; 61; 135]. При этом частицы сыпучего материала приобретают свойства жидкости. Получить виброоживленный или виброкипящий слой возможно с помощью нескольких методов:

- применение воздуха, подаваемого под избыточным давлением под слой материала; в результате этого газ проходит в межчастичном пространстве и как бы поднимает частицы, и они начинают совершать колебательные движения;

- второй способ заключается в подводе динамических нагрузок в виде вибраций определенной частоты и амплитуды. Ускорение вибрации при этом способе составляет порядка $50 - 100 \text{ м/с}^2$;

- третий способ заключается в применении вращающихся рабочих органов. Зачастую данный способ используется при смешении сыпучих материалов, скорость движения перемешивающего устройства должна быть не менее 5 м/с [69].

Для перевода сыпучего материала в виброожигенное состояние затрачивается энергия на преодоление гидравлического сопротивления или наложения колебаний при совершении механической работы и т. д. В среднем, согласно литературным данным, на процесс перевода сыпучего материала в виброожигенное состояние затрачивается порядка от 10 до 100 Дж/кг, при этом большее значение тратится при использовании газа под избыточным давлением.

В общем виде удельные энергозатраты для перевода материала в виброожигенное состояние можно представить следующим выражением:

$$\mathcal{E}_y = K \cdot f_1^a \cdot f_2^b \cdot \dots \cdot f_n^z, \quad (1.1)$$

где \mathcal{E}_y – удельные затраты энергии, Дж/кг;

K – коэффициент пропорциональности;

f_1, f_2, \dots, f_n – факторы, оказывающие наибольшее влияние в каждом конкретном случае;

a, b, \dots, z – показатели степени.

С использованием наложения колебаний в зоне работы активатора возможно интенсифицировать процесс как зародышеобразования, так и разрушения крупных гранул и уплотнения формируемых частиц [68; 72].

1.3.3 Технические решения способов внесения вязкой жидкости в процессе гранулирования

Внесение рабочей жидкости характеризуется рядом возникающих проблем. С целью повышения прочности получаемого гранулята используют связующие растворы, обладающие повышенным значением вязкости, например, концентрированные соки или экстракты, которые обладают достаточно высоким значением адгезии, в следствии этого могут образовываться частицы больших

размеров, которые не всегда возможно разрушить в зоне работы активатора. Стоит также отметить, что такой продукт может наслаиваться на поверхности рабочей тарели в виде гарнисажа, что приводит к необходимости установки дополнительных конструктивных элементов для их срезания [62; 67; 118; 122].

Поэтому для ввода связующего раствора в гранулятор используют зачастую два способа. Первый способ заключается в установке форсунок распылительного типа, которые распределяют равномерно связующий раствор по всей поверхности дисперсного материала, однако в данном случае необходимо активное перемешивание дисперсной фазы с целью перераспределения рабочей жидкости. Второй способ заключается в распределении жидкости по инертной поверхности, попадая на которую, сыпучий материал начинает агломерироваться с последующим образованием зародышей гранул.

Стоит отметить, что при гранулировании компонентов с большим различием их содержания в смеси, те из них, которые входят в композицию в малом количестве, можно вносить в виде растворов или суспензий. Такой способ позволяет получать качественные смеси при различии содержания компонентов в 100-1000 раз [57; 119].

Согласно (RU 2159147, МПК В01F7/26, опубл. 20.11.2000) разработана конструкция смесителя сыпучих компонентов с добавлением жидких веществ (рисунок 1.9).

Исходные сыпучие и жидкие компоненты дозируются в центр распылительного диска. На диске под действием центробежных сил и сил трения о диск исходных материалов происходит их смешивание. Образующаяся смесь жидкой и твердой фаз под действием центробежной силы отбрасывается к внутренней поверхности корпуса. Ножи, расположенные под диском, необходимы для стабилизации процесса смешивания жидких и сыпучих компонентов смеси. Отражатель предусмотрен для предотвращения перемещения продукта к патрубку отвода материала. Продукт в дальнейшем подвергается динамическому воздействию ножей, находясь на отражателе и внутренней поверхности корпуса. В процессе разрушения происходит активное перераспределение частиц, в

результате чего смесь становится более однородной. Далее смесь разделяется на два потока, один возвращается на диск, а второй перемещается к разгрузочному патрубку.

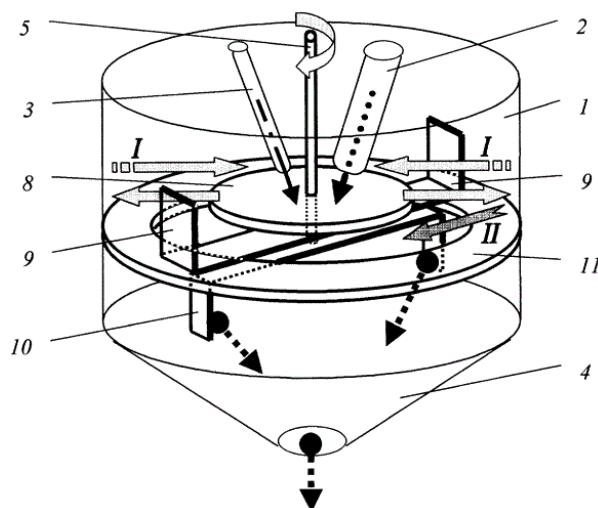


Рисунок 1.9 - Смеситель порошкообразных материалов с жидкими добавками:
1 – корпус; 2, 3, 4 – патрубки; 5 – привод вала; 6, 7 – роторы; 8 – диск распылитель;
9, 10 – ножи; 11 – отражатель

К недостаткам данной конструкции можно отнести налипание смеси жидких и сыпучих компонентов на поверхность диска – это, в конечном итоге, может привести к срыву процесса смешивания.

Известен центробежный смеситель непрерывного действия (RU 2191063, МПК В01F7/26, опубл. 20.10.2002). Установка (рисунок 1.10) работает следующим образом. Исходные сыпучие компоненты подаются через загрузочный патрубок по воронке. Связующий раствор подается через патрубок (5), где разбрызгивается диском (14). Раствор соскальзывает с диска через отверстия направляющей воронки на устройство (8), которое распределяет его по поверхности.

Интенсивное перемешивание материалов жидкой и сыпучей фаз происходит за счет вращения лопастей (15) в устройстве (8), это позволяет перераспределить жидкую фазу.

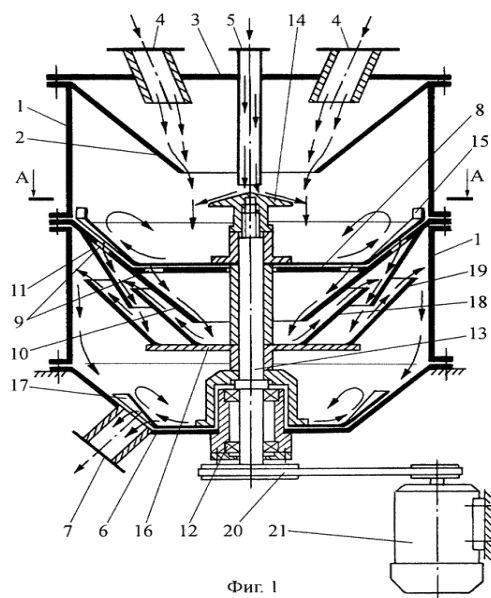


Рисунок 1.10 – Смеситель-гранулятор:

- 1 – обечайка; 2 – воронка; 3 – крышка; 4, 5 – патрубки; 6 – днище;
 7 – разгрузочный патрубок; 8 – приемно-распределительное устройство;
 9 – отверстия; 10, 11 – полые усеченные конусы; 12 – подшипниковый узел;
 13 – вал; 14 – диск; 15 – лопасть; 16 – ротор; 17 – лопасть; 18 – усеченный конус;
 19 – внутренний конус; 20 – клиноременная передача; 21 – электродвигатель

После прохождения первой ступени смесь жидкой и твердой фаз передается на вторую ступень, где происходит активное их перемешивание в разряженном состоянии между двух усеченных конусов (18) и (19). После прохождения межконусного пространства смесь передается на направляющий конус (11), куда подается смесь фаз из распределительного устройства (8). Суммарный поток ссыпается с поверхности внешнего направляющего конуса на внутреннюю поверхность конуса (19) ротора (16). На поверхности внешнего конуса (19) происходит тот же процесс, что и на поверхности внутреннего конуса (18).

Смесь, сошедшая с верхней кромки внешнего конуса (19), ссыпается на днище (6) смесителя. Из смесителя смесь выводится разгрузочными лопастями (17) через разгрузочный патрубок (7). При этом происходит дополнительное перемешивание смеси, что улучшает качество готовой композиции.

К недостатку данной конструкции смесителя сыпучих и жидких компонентов можно отнести сложность конструкции, а распределительное устройство может работать только с жидкостями, обладающими малой вязкостью.

1.4 Методы системного подхода к организации технологического потока

Совершенствование машинно-аппаратурного оформления технологических линий напрямую связано с определением их узких мест и систематизацией влияния внутренних и внешних факторов на качество получаемого продукта. Согласно теории технологического потока, предложенной академиком В.А. Панфиловым, такой анализ целесообразней, представляя линию производства как единую систему, состоящую из подсистем, процессоров и операторов. Такое представление позволяет отойти от аппаратурного оформления и перейти непосредственно к анализу процессов, протекающих с исходным сырьем на каждой стадии производства.

Сложные технологические потоки имеют разветвленную структуру, поэтому в данном случае необходимо устанавливать функциональные связи между подсистемами и операторами, поскольку именно они могут вводить возмущающее действие на стабильность и устойчивость системы.

Вновь создаваемый объект может быть составлен с помощью модульного метода из определенных идентичных блоков, что ускоряет процесс разработки и перехода к аппаратурному оформлению процесса. Данная технология позволяет снизить вероятность нахождения системы в суммативной области. Метод системного анализа и синтеза технологического потока позволяет достичь следующих результатов:

– блочно-модульного построения системы машин, целесообразного агрегатирования машин и аппаратов, создания комплексного оборудования;

- оптимизации допусков на входы и выходы технологических операций и связи их в единое целое;
- выявления требований к качеству исходного сырья и условиям окружающей среды с точки зрения высокой эффективности организации технологии его переработки.

1.5 Выводы по главе

На сегодняшний день на рынке в широком ассортименте представлены инстантированные продукты, что рождает достаточно жесткую конкуренцию среди производителей. Это, в свою очередь, приводит к необходимости совершенствовать технологии их изготовления, снижая себестоимость готовой продукции и повышая ее качество. Анализ литературно-патентного обзора и источников периодических изданий позволил определить актуальность исследований в области производства инстант-напитков и сформулировать основные задачи исследований:

- анализ результатов исследований технологического потока получения инстант-напитков на основе ягодного сырья и поиск путей повышения стабильности организованной системы производства;
- разработка аппаратного оформления процесса структурообразования гранулированных инстант-напитков из полидисперсных многокомпонентных сыпучих материалов с добавлением связующего раствора;
- установить взаимосвязь режимных и конструктивных параметров процесса и структурно-механических свойств готовой продукции;
- установить возможность внесения в рецептуру инстант-напитков рисового крахмала и его модификации на стадии структурообразования;
- установить уровень целостности полученной системы производства.

ГЛАВА 2 МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования проводились в Кемеровском государственном университете, а также на предприятии ООО НПО «Здоровое питание» (г. Кемерово) в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 2.1.

На первом этапе проведен анализ научно-технической литературы и патентной информации по теме исследования диссертации.

Второй этап посвящен аналитическим и экспериментальным исследованиям физико-химических, физико-механических, реологических свойств компонентов, входящих в состав разрабатываемого продукта, конечного продукта, а также технологического потока производства быстрорастворимого гранулированного напитка с целью выявления уровня целостности и организованности существующей технологии, нестабильных подсистем, необходимости совершенствования для получения функционального продукта с заданными потребительскими свойствами.

На третьем этапе изучены общие закономерности и особенности агломерации полидисперсных материалов. Выявлены и предложены пути решения проблем, снижающих эффективность работы гранулятора, основной единицы оборудования, вносящей наибольшую нестабильность в функционирование системы производства быстрорастворимого напитка. Определено влияние режимно-конструктивных параметров гранулятора на процесс структурообразования и качество гранул.

На четвертом этапе обоснована возможность использования рисового крахмала в качестве структурообразователя в быстрорастворимых напитках.

Пятый этап работы заключается в системном анализе и синтезе модернизированного технологического потока производства быстрорастворимого продукта. Выполнена диагностика технологического потока, и выбрано направление его развития на основе энтропийной оценки стабильности

функционирования подсистем и определения уровня целостности всей системы. Проведена промышленная апробация и внедрение полученных результатов.

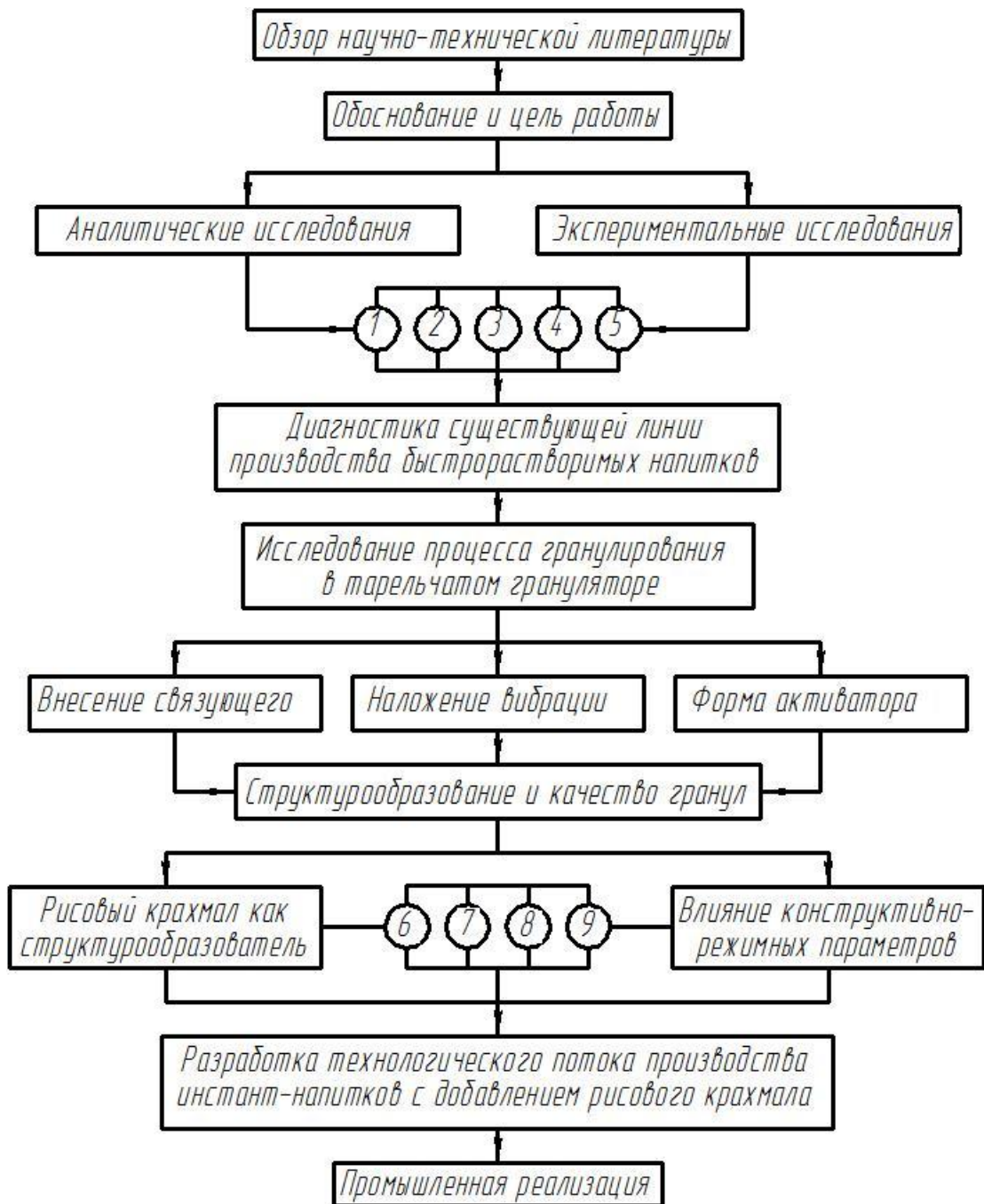


Рисунок 2.1 – Схема проведения исследований:

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

2.1 Объекты исследования

2.1.1 Обоснование выбора материала исследования

Кисель – национальный русский напиток, давно известный потребителю. В настоящее время широкое распространение находят порошкообразные инстантированные формы данного продукта. Это связано с простотой получения готового продукта, а использование в качестве компонентов натуральных концентрированных соков или экстрактов повышает пищевую ценность готового продукта [96; 98].

Основными компонентами инстантированных киселей является крахмал, сахарная пудра и концентрированный ягодный сок (экстракт).

Крахмал является основным элементом готового продукта, при его контакте с водой он набухает и придает напитку свойственную ему консистенцию и вязкость.

Вид крахмала зависит от сырья, из которого его получают. В настоящее время в нашей стране распространен картофельный крахмал, что связано с широкой возделываемостью данной культуры и её урожайностью [100; 101].

Крахмал откладывается в продукте переработки в виде отдельных зерен. При этом размер и форма зерен зависит от вида продукта. Так зерна крахмала в картофеле представлены в виде вытянутых шариков, размеры которых в среднем составляют 100 мкм [102; 103].

Свойства крахмала, такие как скорость набухания при контакте с водой, скорость клейстеризации, адсорбционные свойства, напрямую зависят от свойств гранул крахмала. Кроме того, в крахмале, содержащем более мелкие зерна, присутствует большее количество амилозы, что характеризует водопоглощение и температуру желатинизации данного крахмала. Для крахмала с более мелкими зёрнами свойственна более высокая температура желатинизации. При увеличении

размеров зерен снижается температура клейстеризации и увеличивается вязкость получаемого продукта.

Помимо картофельного крахмала широкое применение находят другие виды крахмала. Так, рисовый крахмал имеет более мелкие зерна, размеры которых колеблются от 3 до 8 мкм. Меньшие размеры крахмальных зерен позволяют облегчить процесс гранулирования инстантированных продуктов, содержащих крахмал, получать гранулы готового продукта заданной формы и размеров [106].

Однако получение продуктов из крахмала с мелкими зернами влечет за собой увеличение температуры воды при приготовлении готового киселя и уменьшение вязкости.

Для исключения данного недостатка применяются модифицированные виды рисового крахмала. Модификация проводится при повышенных температурах, позволяет получать при тех же размерах зерен крахмал с низкой температурой клейстеризации и большей вязкостью готового продукта [108].

Еще одним компонентом инстантированного киселя является концентрированный ягодный сок, также может применяться концентрированный ягодный экстракт.

Концентрированные ягодные соки (экстракты) предпочтительней использовать из местного сырья. Это связано с широкой сырьевой базой, приверженностью и любовью покупателей к местным плодам и ягодам [97; 109].

Одним из такого сырья являются ягоды черники. Данные ягоды имеют широкое распространение на территории Западно-Сибирского федерального округа, богаты витаминами, макро- и микроэлементами. Также ягоды черники содержат большое количество антоцианов-гликозидов дельфинида и мальвидина, дубильных веществ конденсированной природы, органические кислоты, аскорбиновую кислоту, каротин, витамины В1, Р, пектиновые вещества, соли марганца и железа [113; 125].

2.1.2 Методология анализа и синтеза технологического потока

Проектирование высокопроизводительных линий является актуальной задачей. Для данного типа производства характерно использование непрерывно действующего оборудования. Данные линии обладают высокой производительностью, но вместе с тем они зачастую не являются гибкими, то есть легко перенастраиваемыми на другой вид сырья или готовой продукции. При этом они требуют большого количества сырья, что во многих случаях для производства небольших партий, но с широкой номенклатурой, является затруднительным [2; 16; 38].

Выгодно отличающимися своей простотой перенастройки являются линии, организованные по принципу цикличности работы, то есть оснащённые в большей степени оборудованием периодического действия. Производства, в основе которых лежит данный принцип, обычно работают на широком спектре сырья и при необходимости легко перенастраиваются под него. Эти производства являются привлекательной нишей для малого и среднего бизнеса, так как не требуют больших капитальных вложений и при этом позволяют выпускать широкую линейку наименований готовой продукции, что позволяет повысить их конкурентоспособность.

Учитывая достоинства линий, организованных по принципу периодичности работы оборудования, перед проектировщиками данных линий лежит непростая задача. Еще более трудная задача лежит перед специалистами, совершенствующими уже функционирующие линии данного типа [70].

В настоящее время при проектировании и совершенствовании линий широко применяется системный подход, достоинства которого заключаются в полноте анализа не только строения, но и всего жизненного цикла линии от ее создания до утилизации.

Согласно системному подходу любая линия может быть рассмотрена как система взаимодействующих между собой элементов, и в общем взаимодействия

линии с окружающей средой, как внешним возбудителем. При этом для осуществления технологического процесса применяется многофункциональное оборудование, его количество при этом должно быть минимальным.

Системный подход для оценки качества функционирования линий использует операторные модели. Операторная модель – графическое описание линии, которое выражается в графическом изображении процессов, протекающих при получении продукции, при этом соблюдается принцип «вход-выход». Данный способ позволяет отойти от существующего аппаратного оформления линии и в полной мере охватить весь технологический процесс производства.

Изображая технологический процесс как цепочку связанных между собой материальными потоками процессов, операторная модель позволяет разделить систему на более мелкие подсистемы, что приводит к возможности определения целостности всей системы, используя математический аппарат [78].

Так при определении целостности системы важным параметром является количество подсистем в данной системе и их стабильность. Для определения стабильности подсистемы, входящей в систему, используется формула:

$$\eta = 1 - \frac{H}{H_{max}}, \quad (2.1)$$

где H – энтропия состояния подсистемы, соответствующая данному распределению значений величины показателя качества полуфабриката или готового продукта;

H_{max} – максимально возможная энтропия, подчиняющаяся закону равномерного распределения.

Энтропия состояния подсистемы имеет максимальное значение, равное 1. Определяется энтропия состояния подсистемы по следующей формуле:

$$H = -P \times \log_2 P - (1 - P) \times \log_2(1 - P), \quad (2.2)$$

где P – частота любого из равновероятных результатов.

Исходя из этого, для определения целесообразности совершенствования линии необходимо определить её уровень целостности и далее, используя диаграмму модели процесса развития технологического потока, определить, находится ли данная линия в области суммативных систем, то есть необходима ли модернизация, либо целостность системы лежит в области высокоорганизованных систем и её модернизация не целесообразна.

Для определения уровня целостности строится операторная модель линии, выделяются подсистемы. Далее эмпирическим путем определяется стабильность каждой подсистемы в системе и вычисляется уровень целостности всей системы.

При необходимости её модернизации, опираясь на значения стабильности каждой подсистемы, определяется направление модернизации линии [43].

2.1.3 Описание экспериментальной установки и методики проведения исследований

На рисунке 2.2 представлена схема экспериментальной установки [82; 83; 84]. Основным элементом является смеситель-гранулятор, состоящий из тарели (1), расположенной под углом 60° к горизонту. Диаметр тарели составлял 450 мм. По периферии тарель имеет отбортовку, высота которой составляет 250 мм. В процессе гранулирования тарель вращается от собственного привода, состоящего из стабилизатора тока, ЛАТРа, диодного моста и двигателя постоянного тока.

Во второй четверти тарели перпендикулярно к ней расположен активатор (4). Активатор снабжен лопастями. Поверхность лопастей находится под углом к

горизонтальной плоскости. В процессе работы гранулятора активатор вращается в направлении, противоположном направлению вращения тарели.

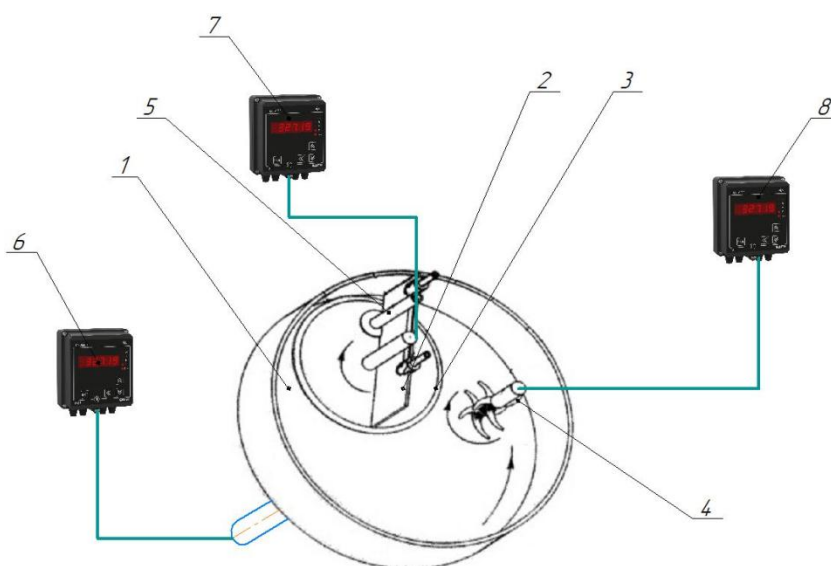


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки

Привод вращения активатора состоит из стабилизатора тока, ЛАТРа, диодного моста и двигателя постоянного тока. Помимо вращения активатор совершает возвратно-поступательное движение в плоскости, перпендикулярной тарели. Амплитуда колебаний активатора задается кулачком со специальным профилем. Вращение кулачка осуществляется также через стабилизатор тока, диодный мост, ЛАТР и двигатель постоянного тока.

Помимо активатора на тарели установлен диск (3) в зоне 12 часов. Диаметр диска составляет 225 мм, по периферии диск снабжен острой кромкой. Расстояние от отбортовки тарели до кромки диска в верхней части составляет 3 мм.

Над поверхностью диска установлено устройство подачи жидкой фазы (5), а также отбойный нож (2). Высота установки диска от дна тарели составляет 4 мм. В процессе работы диск вращается в сторону, противоположную вращению тарели. Привод вращения диска состоит из стабилизатора тока, ЛАТРа, диодного моста и двигателя постоянного тока. Устройство подачи жидкой фазы расположено на минимально возможном расстоянии от поверхности диска.

Принцип работы. В наклонную тарель смесителя-гранулятора подается крахмал, далее при помощи устройства подачи жидкой фазы производится ввод концентрированного сока или экстракта в расчетном количестве. Жидкая фаза в виде тонкого слоя распределяется по поверхности вращающегося диска. На полученную смоченную поверхность постепенно начинают налипать частицы порошкообразной смеси. На поверхности диска образуется слой, который непрерывно срезается отбойным ножом. Далее полученная смесь отбрасывается на активатор, где происходит интенсивное смешение с остальной массой порошкообразной смеси и поступающей сахарной пудрой. Происходит смешивание с получением однородной порошкообразной смеси сыпучих компонентов. Помимо смешивающего и уплотняющего воздействия использование активатора позволяет препятствовать образованию крупных агломератов, измельчая их.

Продолжительность процесса гранулирования составляла в среднем 15 мин. По окончании процесса гранулирования полученные гранулы со средним модальным размером $3\pm 0,5$ мм выгружались из гранулятора и направлялись на сушку.

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 ТХ01-RS. Изменение частоты вращения осуществлялось при помощи ЛАТРа.

Схема подключения двигателей и определения потребляемой мощности для тарели, диска и активатора идентичны (рисунок 2.3).

В приводах применялись электродвигатели постоянного тока. Для подключения к сети двигателя переменного тока (4) использовался диодный мост (2). Для регулирования частоты вращения выходного вала электродвигателя применялся ЛАТР1. Определение потребляемой мощности каждого привода производилось ваттметром (3) типа Д 5016 с классом точности 0,2 по ГОСТ 8476-78.

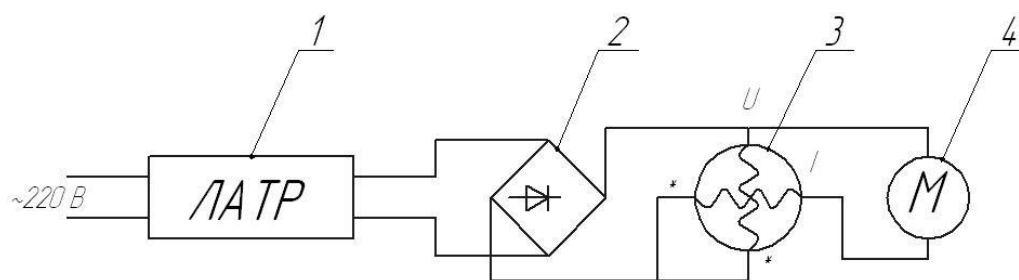


Рисунок 2.3 – Электрическая схема измерения мощности: 1 – лабораторный автотрансформатор; 2 – диодный мост; 3 – ваттметр; 4 – электродвигатель

Так, в процессе работы при помощи ваттметра определялся полный расход мощности. С целью нахождения полезной мощности, то есть мощности, непосредственно идущей на процесс гранулирования, использовалась формула:

$$N_{\text{п}} = 0,95N - N_{\text{хх}}, \quad (2.3)$$

где N – полезная мощность, измеренная ваттметром, Вт,

$N_{\text{хх}}$ – мощность холостого хода, Вт.

Помимо вычитания из полной мощности «мощности холостого хода» (мощность при работе привода без продукта), её значение снижалось на 5 %, что связано с нивелированием потерь мощности в меди [30].

Для нахождения рациональных параметров работы аппарата варьировались следующие параметры: частота вращения тарели $n_{\text{т}}$ – от 30 об/мин до 60 об/мин., частота вращения диска $n_{\text{р}}$ – от 15 об/мин до 30 об/мин., частота вращения активатора $n_{\text{а}}$ – от 600 об/мин до 1500 об/мин., амплитуда колебаний активатора $A_{\text{а}}$ – от 0,5 до 2,5 мм, частота колебаний активатора ν – от 20 до 50 Гц.

Изменение амплитуды колебаний активатора задавали при помощи профилированных кулачков.

По окончании процесса гранулирования определялся дисперсный состав полученного гранулята и модальный размер полученных гранул. Для определения

дисперсного состава применялся набор сит с номерами: 4; 3,5; 3; 2,75; 2,5; 2,25; 2; 1,5; 1; 0,45; 0,4; 0,315; 0,2. Определение дисперсного состава гранулята проводилось следующим образом: полученный гранулят выгружался из смесителя-гранулятора и последовательно пропускаться через набор сит от большего к меньшему. Далее полученные фракции подвергались взвешиванию при помощи аналитических весов 2 класса ВЛР-200 г с использованием гирь. Погрешность весов составляла $\pm 0,15$ мг, а погрешность образцовых гирь не превышала 0,01 мг, и производился подсчет количества гранул в каждой из фракций.

Для получения достоверных значений измеряемых параметров на каждом режиме работы проводилась серия повторных опытов. Результаты, значительно отличающиеся от средних, исключались. Кроме того, качественный анализ каждой пробы полученного гранулята проводился в трех повторах, что позволяет говорить о достоверности полученных результатов.

2.2 Методы исследования

2.2.1 Методология определения технологических свойств порошкообразных материалов

К основным структурным свойствам порошкообразных материалов можно отнести: насыпную плотность, сыпучесть, угол естественного откоса, влажность, дисперсность [8].

Определение насыпной плотности

Насыпная плотность – масса сыпучего материала в единице объёма, при этом учитываются пустоты, образованные при выгрузке материала. Данный показатель зависит от формы и размера частиц, их плотности и влажности всего материала.

Для определения значения насыпной плотности использовался прибор модели 545P-AK-3 (рисунок 2.4).

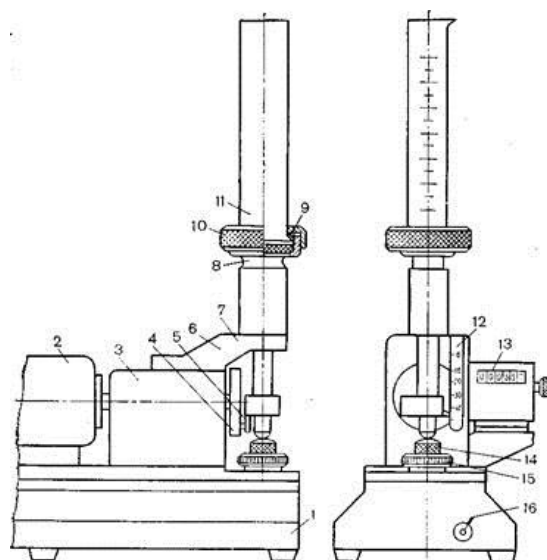


Рисунок 2.4 – Прибор модели 545P-AK-3

Основным элементом конструкции прибора является цилиндр (11), который при помощи прокладки (9) и гайки (10) установлен на втулке (8). Втулка расположена на штоке (7), размещенном в стойке (6). В процессе работы цилиндр колеблется с заданной амплитудой (5 мм) и частотой (2,5 Гц). Для осуществления колебательного движения имеется привод, состоящий из электродвигателя (1) и редуктора (2). Привод и стойка размещены на общем основании (1). Для того, чтобы задать амплитуду имеются регулирующий винт (14) и контргайка (15). Значение заданной амплитуды фиксируется на шкале (12). Включение и выключение прибора осуществляется при помощи тумблера (16).

Принцип действия. Порошкообразный материал массой 5 г, взвешенный на аналитических весах ВЛР-200 г, с использованием гирь помещался в цилиндр прибора. Включался прибор. По истечении 10 минут, когда уровень материала в цилиндре становился постоянным, прибор выключался.

Значение насыпной плотности определяли по формуле:

$$K_n = \frac{m}{V}, \text{ кг/м}^3, \quad (2.4)$$

где: m – масса порошкообразного материала, кг,

V – объём порошка (гранулята) в цилиндре после утряски, м³.

Определение сыпучести

Сыпучесть – характеристика порошкообразных материалов, показывающая способность к высыпанию материала из емкости под действием силы тяжести и равномерность заполнения пустот.

Для определения показателей сыпучести материала использовался прибор модели ВП-12А (рисунок 2.5).

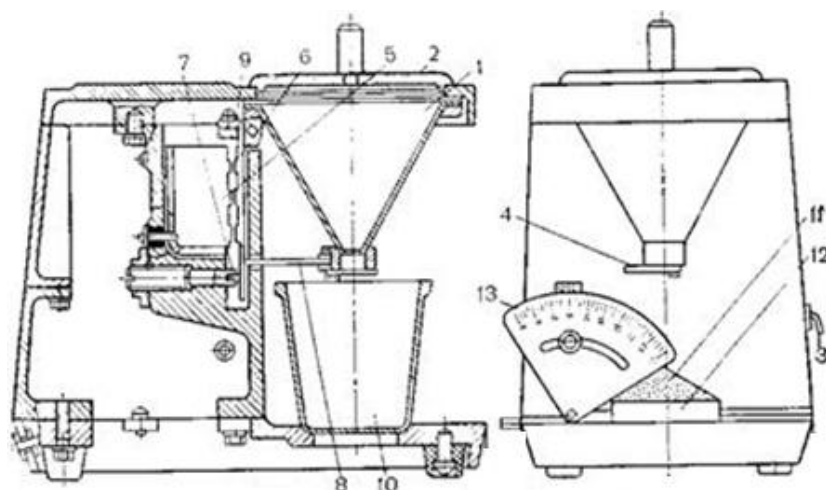


Рисунок 2.5 – Прибор модели ВП-12А

Основным элементом конструкции прибора является воронка (1) с крышкой (2) в верхней части и заслонкой (4) в нижней. Для встряхивания воронки имеется электромагнит (5), якорь (6), амортизатор (7), тяга (8) и шарнир (9). Для высыпания материала имеется стакан (10), для включения и выключения прибора имеется тумблер (3).

Принцип действия. Предварительно взвешенный материал на аналитических весах ВЛР-200 г массой 50 г засыпается в воронку прибора.

Включается привод вибрационного устройства. Продолжительность процесса измеряли при помощи секундомера с ценой деления 0,2 с и погрешностью хода 0,05 %. По истечении 20 с прибор выключался, и материал ссыпался из воронки в стакан. Значение показателя сыпучести определяли по формуле:

$$V_c = \frac{m}{t-20}, \text{ кг/с}, \quad (2.5)$$

где: m – масса порошкообразного материала, кг,

t – полное время проведения эксперимента, с.

Определение угла естественного откоса

Угол естественного откоса – угол, полученный образующей конуса сыпучего материала и горизонтом. Данный показатель для хорошо сыпучих материалов колеблется в пределах 25-30°, а для связных материалов 60-70°. Этот показатель определяет сыпучесть материала.

Для его определения применяется прибор модели ВП-12А (рисунок 2.5). Материал массой 50 г засыпается в воронку прибора. Далее прибор включается, и открывается заслонка, материал под собственным весом от вибрации воронки высыпается в кольцо (12), образуется горка из материала (11). Далее излишки материала убираются, и подводится угломер (13), при помощи которого определяется угол естественного откоса.

Определение влажности порошкообразного материала

Для определения влажности использовался анализатор влажности МХ-50 (рисунок 2.6).

Работа анализатора. Прибор предварительно разогревается до рабочей температуры. Далее в чашу засыпается заранее взвешенная порция материала (30 г). После чего чаша устанавливается в прибор, закрывается крышка. Принцип измерения влажности основывается на измерении массы продукта встроенными весами до полного высушивания и после него. Нагрев и высушивание материала

производятся встроенным ТЭНом в крышку прибора. Далее находится разница между этими показателями и находится отношение полученного значения к первоначальной массе материала. Полученное значение умножается на 100 %, и получается значение первоначальной влажности материала.

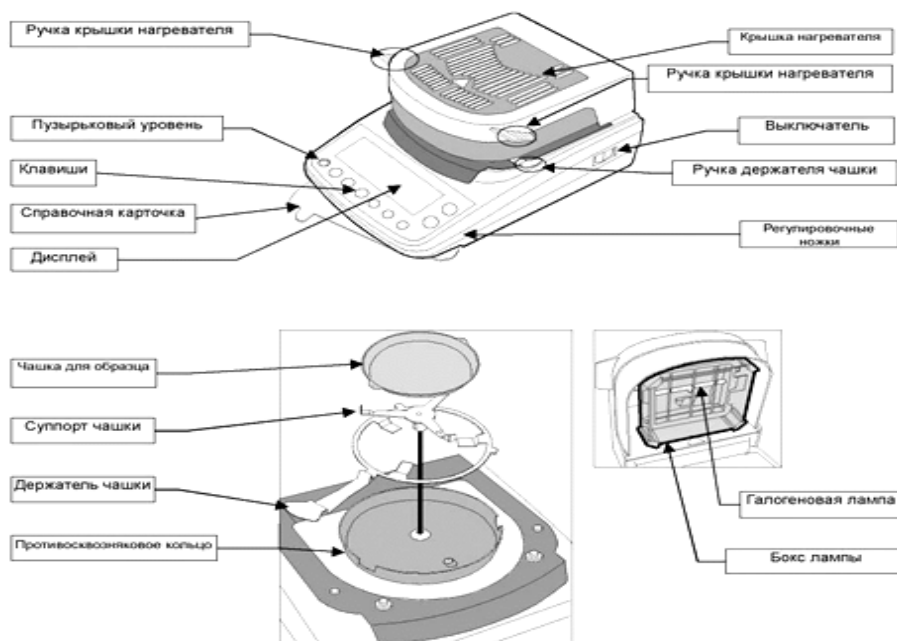


Рисунок 2.6 – Анализатор влажности МХ-50

Данный прибор позволяет проводить взвешивание и расчет влажности в автоматическом режиме без участия оператора. Искомое значение влажности материала высвечивается на табло прибора по окончании процесса определения.

Определение дисперсного состава порошкообразного материала

Дисперсный анализ порошкообразного материала позволяет определить размеры фракций и их процентное содержание в общей массе материала, выполняется для подбора рациональных параметров работы оборудования и определения энергии свободной поверхности.

Для определения дисперсного состава использовался микроскоп Levenhuk 40L NG с цифровой камерой DCM310, с помощью которого выполнялись фотографии проб смесей. Пробу брали произвольно из смеси крахмалов, полученных в смесителе-грануляторе.

Далее пробу помещали на предметное стекло в дисперсионную среду. В качестве дисперсной среды использовалась жидкость, в которой не происходило растворение зерен крахмала – изобутиловый спирт. Делалось шесть фотографий в произвольных местах. Далее при помощи программы ImageTool v. 300 производился автоматический подсчет количества зерен крахмала и их размера.

2.2.2 Методология определения прочности гранул

Одной из основных характеристик готового гранулированного продукта является его прочность. При этом практическое значение имеет прочность при сжатии гранул и их прочность при истирании [33].

Так как готовый продукт имеет низкий показатель влажности (6–9 %), его состояние ближе к хрупкому. То есть при сжатии данный материал проявляет хрупкие свойства: его предел прочности выше, чем у пластичного состояния вещества, но при этом отсутствует текучесть. Разрушение происходит за счет отрыва части материала от основной массы, происходит оно обычно по дефектам структуры. Трещина зарождается в дефектах структуры гранулы, образованной при её гранулировании, и далее возникший зародыш трещины распространяется по грануле.

Исходя из этого можно утверждать, что исследование готового продукта на прочность является одним из основных показателей качества как процесса гранулирования, так и готовой продукции.

Методология исследования прочности гранул на сжатие

Для определения прочности гранул на сжатие применялся прибор ХНИХФИ (рисунок 2.7). В корпусе (1) прибора расположены плунжер (2), винтовая пружина (3), нажимной винт (4) и гайка (5). Для снятия показаний имеется линейка с ползунком (6), закрепленная на гайке. Для исключения проворачивания в корпусе гайки и плунжера в нем имеется прорезь.

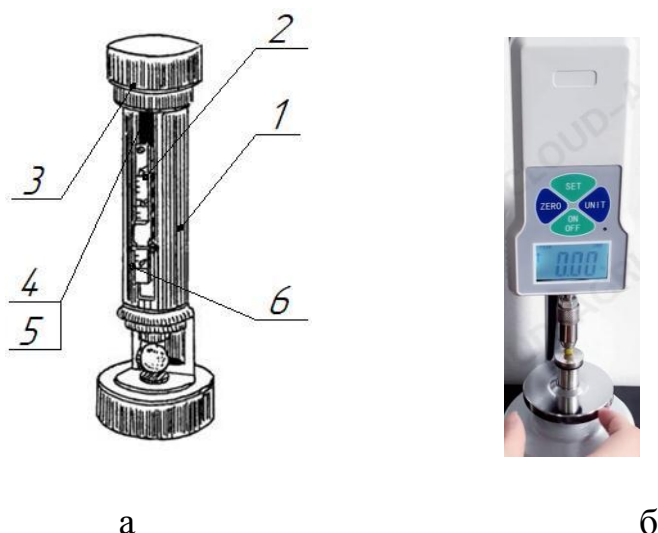


Рисунок 2.7 – Прибор ХНИХФИ для определения прочности гранул
а – схема прибора; б – общий вид прибора

Принцип действия. Гранула устанавливается на стол, расположенный под плунжером. Далее вручную проворачивается винт, плунжер сжимает гранулу. Процесс проводят до разрушения гранулы. При разрушении ползунок фиксирует нагрузку, которая привела к разрушению.

Далее вычисляется предел прочности гранул при сжатии по формуле:

$$K = \frac{P}{d^2}, \text{ МПа,} \quad (2.6)$$

где P – разрушающая нагрузка, Н;

d – диаметр гранулы по центру, мм.

Показатель прочности должен находиться в пределах 0,25–0,8 МПа.

Методология исследования прочности гранул на истирание

Сопротивление истиранию – важный показатель для любых формованных порошкообразных продуктов: гранул, таблеток, брикетов и т. п. Это связано с такими процессами, как упаковывание готовой продукции, её транспортирование.

При проведении данных процессов при низкой сопротивляемости истиранию часть отформованного материала откалывается и превращается в пылевидную фракцию, что приводит к потере внешнего вида продукта и части продукта.

Для определения истираемости применялся фриабилятор типа 545-Р-АК-8 – прибор барабанного типа (рисунок 2.8). Фриабилятор состоит из корпуса (1), выполненного в виде барабана диаметром 200 мм с крышкой. На внутренней поверхности корпуса по периферии барабана выполнены лопасти (2) в количестве 12 штук. Лопасти расположены под углом 20° к касательной корпуса. Вращение корпуса осуществляется при помощи привода (3), состоящего из электродвигателя и редуктора. Включение и выключение прибора осуществляется тумблером (4).

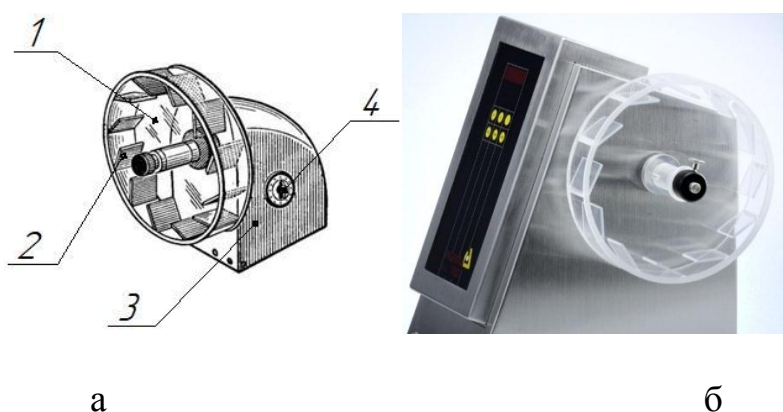


Рисунок 2.8 – Фриабилятор типа 545-Р-АК-8

а – схема прибора; б – общий вид прибора

Принцип действия. Обеспыленные гранулы взвешиваются на аналитических весах ВЛР-200 г. Масса материала, загружаемого в корпус прибора, составляет 30 г. Далее включается привод вращения корпуса. Частота вращения корпуса составляет 20 об/мин. Продолжительность процесса контролировалась секундомером и составляла 5 мин, после чего вращение корпуса останавливалось и полученный материал выгружался. Материал подвергался обеспыливанию и взвешивался на аналитических весах.

Далее по формуле вычислялась прочность гранул при истирании, выраженная в процентах:

$$П = 100 - \frac{m_{\text{нач.}} - m_{\text{кон.}}}{m_{\text{нач.}}} \times 100, \quad (2.7)$$

где $m_{\text{нач.}}$ – масса гранул до истирания, г,

$m_{\text{кон.}}$ – масса гранул после истирания, г.

В процессе воздействия в барабане фриабилятора форма гранул не должна изменяться. А прочность при истирании гранул должна составлять не менее 80–90 %.

2.2.3 Методология определения распадаемости таблеток

Распадаемость – способность формованного порошкообразного (гранулированного) продукта расщепляться при попадании в жидкую среду на отдельные составные части и образовывать однородную суспензию [50].

Получение киселей из гранулированного порошкообразного продукта состоит из двух стадий: распадаемости формованного продукта и его растворения с образованием вязкого насыщенного продукта. То есть скорость распадаемости напрямую влияет на скорость получения готового напитка и является важным фактором при производстве гранулированных киселей.

Распадаемость гранулированного продукта зависит не в малой степени от технологии получения гранул, вида компонентов и их доли в общей массе продукта.

С целью оценки показателей качества готового продукта по такому параметру, как распадаемость, был проведён ряд исследований, для чего

применялся прибор 545-АК-1 – «качающаяся корзинка» (рисунок 2.9). Данный прибор позволяет оценить продолжительность процесса распадаемости гранул.

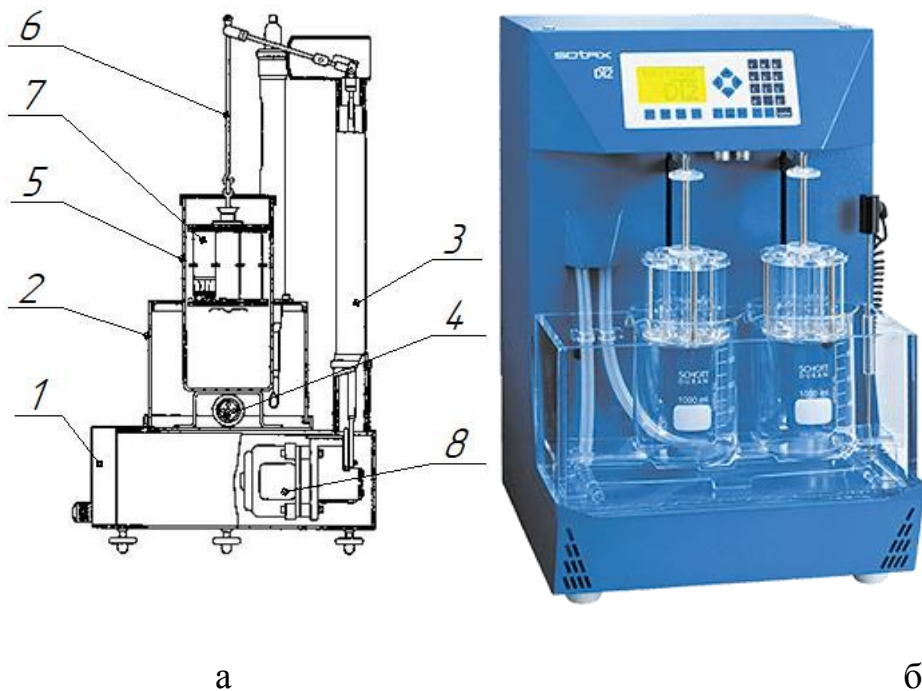


Рисунок 2.9 – Прибор типа 545-АК-1:
а – схема прибора; б – общий вид прибора

В корпусе основания расположен привод (8). На основании располагается термостат (2) и колонка (3). Колонка (3) выполнена полый. Термостат (2) заполнен водой с температурой 95 °С. При этом на протяжении исследования образцов поддерживается постоянная температура в термостате при помощи нагревательного элемента (4).

Внутри термостата расположен стеклянный сосуд (5), внутри которого размещена корзинка (7). Корзинка (7) подвешена на тяге (6). В процессе испытания образцов корзинка при помощи кривошипно-шатунного механизма и привода (8) совершает возвратно-поступательное движение. Движение совершается в вертикальной плоскости. Амплитуда качений корзинки составляет 55 ± 5 мм, а число качаний 28–32 цикла (двойных ходов) в минуту.

Корзинка состоит из двух дисков, выполненных из пластмассы с диаметром 90 мм. На дисках выполнены 6 концентрично расположенных отверстий диаметром 24 мм. Отверстия равноудалены от центра диска. В отверстиях расположены трубки длиной $77,5 \pm 0,025$ мм, выполненные из стекла. Внутренний диаметр трубки составляет 21,5 мм, а толщина стенки – 2 мм. На нижней поверхности нижнего диска расположена проволочная сетка с размером ячейки 0,25 мм.

Принцип работы. В термостат заливается вода в объёме $2/3$ от общего объёма термостата. Температура воды – 95 °С. Далее включают нагрев для поддержания постоянной температуры в термостате и контролируют её при помощи контактного термометра на заданном уровне.

При установке заданной температуры в каждую из трубок помещают гранулы киселя массой 20 г. Далее корзинку опускают в стеклянный сосуд, заполненный водой с температурой 95 °С. При этом контролируют положение корзинки, она не должна касаться стенок сосуда. Далее включают привод качания корзинки и секундомер. Процесс распадаемости фиксируется визуально. При этом процесс распадаемости гранул считается законченным, если все части гранул, отсоединившиеся от общей массы, прошли через сетку.

Процесс окончания распадаемости фиксируется секундомером.

2.3 Оценка точности измерений

Для оценки точности измерений при исследовании различных технологических свойств основного сырья при производстве киселей и готового продукта можно воспользоваться формулой [19; 22; 23]:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (2.7)$$

где X_1, X_2, \dots, X_n – независимые аргументы.

Основным параметром, позволяющим оценить величину погрешности при измерениях, является относительная погрешность. Она определяется суммой квадратов пределов всех абсолютных погрешностей измерений, используемых при проведении исследования. Может быть определена по формуле:

$$\delta_y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \times \Delta x_i \right)^2}, \quad (2.8)$$

где Δx_i – абсолютная величина погрешности i -го прибора.

Исходя из формулы 2.8, определение возможной погрешности при измерении насыпной плотности может быть проведено по формуле:

$$\delta K_H = \pm \left[\left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left(\frac{\Delta m_1}{m_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau} \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (2.9)$$

где Δm – погрешность аналитических весов ВЛР-200г, г,

m – масса материала, взвешиваемого на весах, г,

Δm_1 – погрешность образцовых гирь (использовалась одна гиря), г,

m_1 – масса образцовой гири, г,

ΔV – погрешность мерного цилиндра прибора, см^3 ,

V – объём материала в мерном цилиндре, см^3 ,

$\Delta \tau$ – погрешность секундомера, с,

τ – продолжительность исследования, с.

Измерение продолжительности исследования каждого образца проводили при помощи ручного секундомера с погрешностью хода 0,05 % и ценой деления 0,2 с. При этом необходимо учесть, что погрешность при измерении

продолжительности исследования будет складываться из нескольких слагаемых: погрешность пуска, хода процесса, останова. Для чего можно принять, что погрешность пуска и останова равна цене деления, а принимая во внимание реакцию наблюдателя, для которой погрешность примем 0,1, полная погрешность, учитывающая пуск и останов, будет равна 0,3. Исходя из этого с учетом погрешности хода полная погрешность измерения продолжительности процесса определяются по формуле [26]:

$$\delta\tau = \left(\frac{\Delta\tau_1}{\tau_1}\right) + \tau', \quad (2.10)$$

где $\Delta\tau_1$ – погрешность пуска и останова секундомера, г

τ_1 – продолжительность исследования, с,

τ' - погрешность хода секундомера.

$$\delta\tau = \left(\frac{0,3}{600}\right) + 0,05 = 0,05.$$

Так как измерение объёма проводилось при помощи цилиндра прибора с классом точности 0,5 %, погрешность измерения объёма можно принять равной величине точности.

$$\delta K_H = \pm \left[\left(\frac{0,00015}{5}\right)^2 + \left(\frac{0,00001}{5}\right)^2 + 0,5^2 + 0,05^2 \right]^{0,5} = \pm 0,5025.$$

Погрешность при измерении сыпучести, учитывая формулу 2.8, находится из выражения [32]:

$$\delta V_c = \pm \left[\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_1}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\tau}{\tau}\right)^2 \right]^{0,5}. \quad (2.11)$$

При этом необходимо учесть, что продолжительность исследования сыпучести составляла 20 с.

$$\delta\tau = \left(\frac{0,3}{20}\right) + 0,05 = 0,065,$$

$$\delta V_c = \pm \left[\left(\frac{0,00015}{50}\right)^2 + \left(\frac{0,00001}{50}\right)^2 + 0,5^2 + 0,065^2 \right]^{0,5} = \pm 0,504.$$

Погрешность при измерении угла естественного откоса, учитывая формулу 2.8, находится из выражения:

$$\delta\alpha = \pm \left[\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_1}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)^2 \right]^{0,5}, \quad (2.12)$$

где $\Delta\alpha$ – погрешность угломера, град,

α – среднее значение угла естественного откоса, град.

$$\delta\alpha = \pm \left[\left(\frac{0,00015}{50}\right)^2 + \left(\frac{0,00001}{50}\right)^2 + \left(\frac{1}{28}\right)^2 \right]^{0,5} = \pm 0,035.$$

Значение погрешности измерения влажности можно оценить по значению прибора, которое составляет не более $\pm 2\%$.

Погрешность при измерении прочности гранул будет складываться из погрешности прибора определения предела прочности на сжатие и погрешности измерения размеров гранулы. Формула 2.8 примет вид:

$$\delta K = \pm \left[\delta\Pi + \left(\frac{\Delta d_x}{d_x}\right)^2 \right]^{0,5}, \quad (2.13)$$

где $\delta\Pi$ – погрешность прибора измерения прочности гранул.

Для измерения габаритных размеров гранул использовался штангенциркуль с ценой деления 0,05 мм. Тогда погрешность измерений гранул:

$$\frac{\Delta d_x}{d_x} = \frac{0,05}{3} \times 100 \% = 1,7 \%, \quad (2.14)$$

$$\delta K = 2 + 1,7 = \pm 3,7.$$

Погрешность при измерении истираемости гранул с учетом формулы 2.8 будет определяться:

$$\delta K = \pm \left[2 \times \left(\left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left(\frac{\Delta m_1}{m_1} \right)^2 \right) + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau} \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (2.15)$$

$$\delta \tau = \left(\frac{0,3}{300} \right) + 0,05 = 0,05,$$

$$\delta \Pi = \pm \left[2 \times \left(\left(\frac{0,00015}{30} \right)^2 + \left(\frac{0,00001}{30} \right)^2 \right) + 0,05^2 \right]^{0,5} = \pm 0,051.$$

Погрешность при измерении распадаемости гранул с учетом формулы 2.8 будет определяться [44; 47]:

$$\delta K = \pm \left[\delta \Pi + \left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left(\frac{\Delta m_1}{m_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau} \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (2.16)$$

$$\delta \tau = \left(\frac{0,3}{90} \right) + 0,05 = 0,054,$$

$$\delta K = \pm \left[2 + \left(\frac{0,00015}{20} \right)^2 + \left(\frac{0,00001}{20} \right)^2 + 0,054^2 \right]^{0,5} = \pm 1,3.$$

Так как значение погрешности при всех проводимых исследованиях меньше допустимого $\pm 5 \%$, можно утверждать, что полученные данные достоверны.

2.4 Выводы по главе

1. Приведено обоснование выбора материала исследования. Кисель – национальный русский напиток. Порошкообразный инстантированный продукт для приготовления киселей нашел широкое распространение среди потребителей, а использование в качестве дополнительного сырья концентрированных ягодных соков позволяет повысить его пищевую ценность.

2. Рассмотрена и обоснована методика системного анализа и синтеза для обоснования совершенствования линий и оборудования и пути его модернизации.

3. Представлено описание экспериментальной установки гранулирования порошкообразных смесей и методики проведения исследований.

4. Представлены методики определения основных технологических свойств порошкообразных продуктов и готового гранулированного продукта.

5. Представлены расчеты относительных погрешностей определения свойств компонентов и готовой продукции. Доказана приемлемость полученных результатов исследования свойств при использовании выбранных методик.

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА

3.1 Анализ свойств сырья

Прочность готовых гранул порошкообразного продукта во многом зависит не только от технологии их получения, но и от сырья, входящего в состав гранул.

Так как основным компонентом инстантированных порошкообразных киселей является крахмал, то от его вида и свойств во многом будут зависеть интенсивность протекания процесса гранулирования, форма и размер получаемых гранул, их прочность и скорость распадаемости.

В качестве крахмала используется картофельный со средним размером зерен 100 мкм. Однако возможно и применение смеси крахмалов. Так, модифицированный рисовый крахмал с размером зерен 3–8 мкм, добавленный в определенной пропорции к картофельному, позволит получать гранулы более правильной формы и с более высокими показателями прочностных характеристик [34].

В связи с этим для исследования процесса гранулирования были выбраны следующие смеси крахмалов (СК):

1. Картофельный крахмал (КК);
2. КК с заменой 5 % на модифицированный рисовый крахмал (МРК);
3. КК с заменой 10 % на МРК;
4. КК с заменой 15 % на МРК;

Из условия выбора нескольких различных СК следует, что необходимо изучить их основные технологические свойства и оценить их влияние на процесс гранулирования и качество готовых гранул.

Результаты исследования насыпной плотности, методика определения которой описана в Главе 2, представлены в таблице 3.1 и на графике (рисунок 3.1).

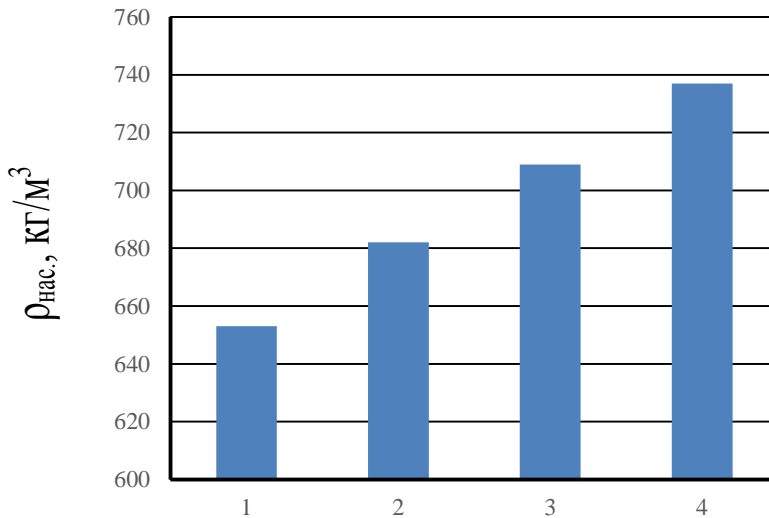


Рисунок 3.1 – Результаты исследования насыпной плотности СК

Полученные значения насыпной плотности показывают, что при увеличении количества рисового крахмала (РК) в общей массе плотность смеси растет. Это связано с тем, что размеры зерен РК имеют меньшие размеры, чем у картофельного, и более плотно упаковываются в заданный объем. То есть можно предположить, что это позволит получать более прочную структуру готовых гранул порошкообразного киселя.

Сыпучесть, как технологическое свойство СК, характеризует интенсивность смешивания компонентов в тарельчатом грануляторе и вероятность их попадания на диск с жидкими компонентами.

Угол естественного откоса в большей степени также характеризует сыпучесть материала. Результаты определения сыпучести и угла естественного откоса СК представлены в таблице 3.1.

Полученные результаты исследований можно обосновать различным дисперсным составом смесей. Так, при увеличении количества РК в общей массе смеси увеличивается количество мелких зерен, что при равномерном распределении по всему объему ведет к увеличению сыпучести материала.

Полученные значения угла естественного откоса подтверждают, что с увеличением доли РК увеличивается сыпучесть готовой смеси.

Таблица 3.1 – Результаты исследований насыпной плотности, сыпучести, угла естественного откоса и влажности СК

№ СК	Наименование СК	Насыпная плотность, кг/м ³	Сыпучесть, кг/с	Угол естественного откоса, град	Влажность, %
1	КК	653	0,0042	34	22
2	95 % КК и 5 % МРК	682	0,005	33	20
3	90 % КК и 10 % МРК	709	0,0053	30	18
4	85 % КК и 15 % МРК	737	0,0054	29	17

Влажность смеси напрямую оказывает влияние на смешение компонентов, на их прилипание к диску с жидкими компонентами и слипаемость отдельных частиц материала. Значения, полученные при исследовании влажности смесей, также представлены в таблице 3.1.

Снижение показателя влажности при увеличении доли РК в общей массе сырья можно объяснить размером частиц РК. Так как размеры зерен РК меньше размеров зерен КК, они в большей степени обладают гидрофобными свойствами, то есть препятствуют насыщению смеси водой.

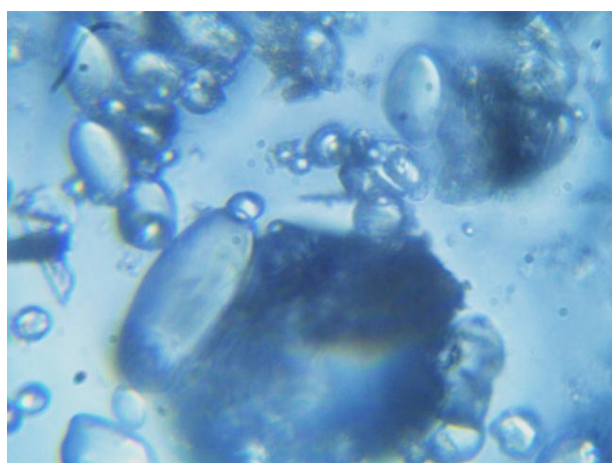
Так, при прочих равных условиях, смесь, содержащая в составе больше РК, будет менее склонна к образованию агломератов, однако это может привести к трудностям при получении гранул, так как сцепление отдельных зерен при отсутствии влаги будет затруднено.

Полученные значения влажности полностью коррелируют с сыпучестью смесей. Так, при уменьшении влажности растет сыпучесть смеси.

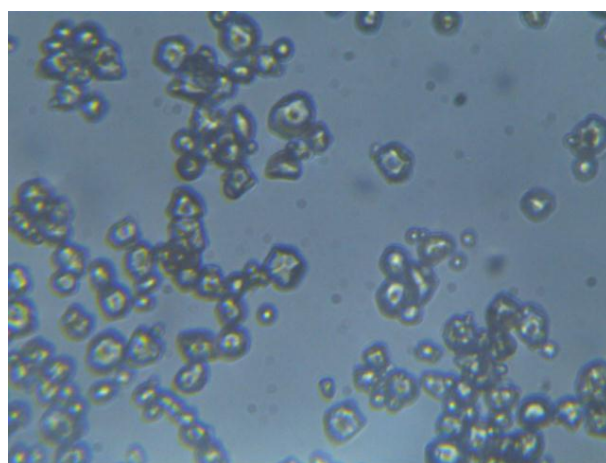
Исследование дисперсного состава смеси необходимо для определения равномерности распределения компонентов с меньшими размерами и меньшим содержанием во всей массе смеси. Смешивание компонентов различных

крахмалов проводили в экспериментальном смесителе-грануляторе. Результаты позволят оценить распределение компонентов рисового крахмала в массе смеси и возможность равномерного покрытия гранул крахмальной смесью в процессе гранулирования, а это в свою очередь даст возможность утверждать, что каждая гранула готового продукта в равной степени содержит одинаковое количество заданных компонентов.

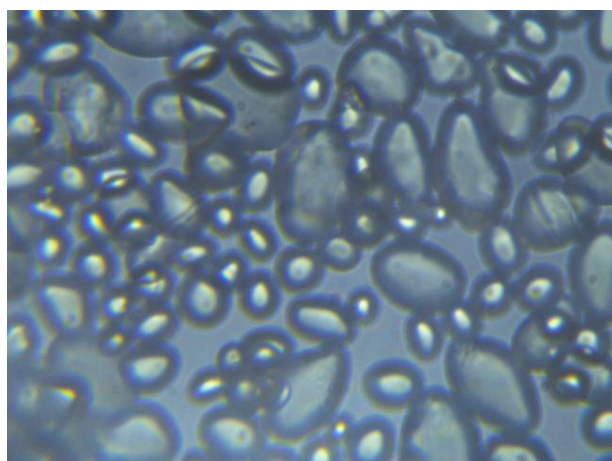
Результаты исследований дисперсного состава представлены в виде фотографий (рисунок 3.2), выполненных при помощи микроскопа Levenhuk 40L NG с цифровой камерой DCM310.



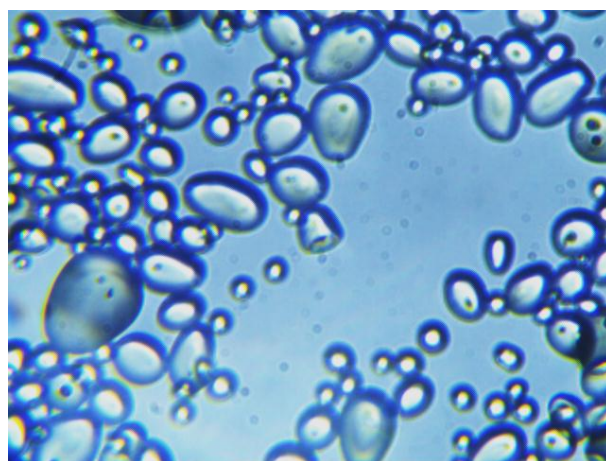
№ 1



№ 2



№ 3



№ 4

Рисунок 3.2 – Результаты исследования дисперсного состава СК

В таблице 3.2 приведен дисперсный состав изучаемых СК. Анализируя дисперсный состав СК, можно сказать, что увеличение доли рисового крахмала в общей массе смеси ведет к увеличению количества более мелкой фракции.

Это скажется непосредственно на процессе гранулирования и свойствах готовых гранул, таких как прочность и скорость распадаемости.

Таблица 3.2 – Дисперсный состав исходных сыпучих компонентов

№, п/п	Размер зерен, мкм	Количество каждой фракции, %			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
1	<4	2	3	3	5
2	4–8	4	6	8	9
3	8–20	9	13	16	17
4	20–40	16	18	21	23
5	40–80	25	23	20	18
6	80–120	36	30	27	25
7	>120	8	7	5	3

3.2 Совершенствование конструкции тарельчатого гранулятора

Процесс гранулирования является сложным механическим процессом, зависящим от многих факторов, и может проходить, используя различные механизмы.

На рисунке 3.3 приведены механизмы связывания отдельных частиц при агломерации. В процессе гранулирования частицы порошкообразной смеси сцепляются и накладываются на зародыши ядра – центры будущей гранулы. При этом структура как самой гранулы, так и зародыша ядра, не однородна, а

представляет собой частицы различной формы и размера, сцепленные между собой и образующие «закрытые» поры.

Механизм связывания отдельных частиц в процессе агломерации может осуществляться сплавлением, при высоких кинетических энергиях их взаимодействия (рисунок 3.3 а). Существуют механизмы связывания частиц за счет химической реакции, возникающей между отдельными частицами материала (рисунок 3.3 б). На рисунке 3.3 в представлен механизм сцепления частиц материала за счет образования жидкостных мостиков. Данный способ сопровождается добавлением жидких связующих компонентов.

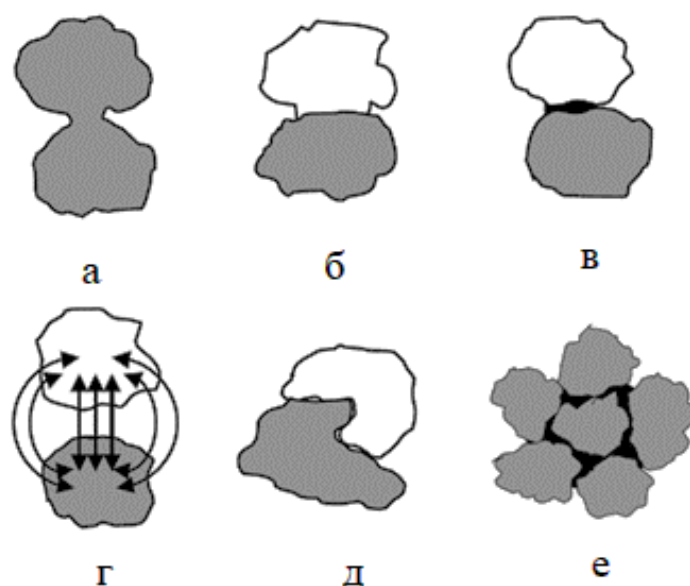


Рисунок 3.3 – Различные механизмы связывания при агломерации:

а) мостики частичного плавления агломерата; б) упрочнение химической реакции связующего; в) связующие жидкие мостики; г) молекулярные силы и силы подобного типа; д) взаимосвязанные узлы; е) капиллярные силы

Существует механизм связывания, основанный на силах молекулярного взаимодействия. Он свойственен для определенных компонентов смеси (рисунок 3.3 г).

При сложных поверхностях частиц возможна агломерация за счет сложных узлов (рисунок 3.3 д). При этом сила сцепления будет зависеть от сил взаимодействия частиц и формы образованных узлов.

Капиллярные силы взаимодействия также могут служить силами, образующими агломераты (рисунок 3.3 е).

При гранулировании инстантированных порошкообразных киселей предпочтительней механизм связывания частиц с использованием жидкостных мостиков. Данный способ позволяет получить гранулы требуемой прочности, и при этом готовый продукт обладает хорошей распадаемостью при контакте с жидкостью.

Одним из основных факторов, влияющих на процесс гранулирования порошкообразных смесей, использующим жидкостный механизм связывания, является способ подачи связующего компонента. В качестве связующего компонента при гранулировании инстантированного порошкообразного киселя выступает концентрированный ягодный сок (экстракт).

Существует три способа подачи жидкого связующего компонента в гранулятор непосредственно в смесь:

- капельный;
- форсуночный;
- наливной.

Для каждого способа гранулирования и аппаратного его оформления предпочтителен один из данных способов. Это связано с зависимостью скорости роста гранул, агломерирующих на жидкой дисперсной фазе, от равномерного распределения связующего компонента по дисперсному материалу.

Принимая во внимание сложность движения дисперсного материала в грануляторах различной конструкции, предпочтение отдается самому эффективному способу подачи жидкого связующего компонента.

Так, для барабанного виброгранулятора, как отмечено в работах [136; 137], наиболее подходит форсуночный способ подачи связующего компонента, позволяющий получить унимодалное распределение размеров гранул.

В процессе гранулирования следует стремиться к унимодалному распределению размеров получаемых гранул, так как это напрямую сказывается

на эффективности процесса гранулирования и качественных характеристиках готового продукта.

Помимо унимодального распределения, в процессе гранулирования может образовываться бимодальное и полимодальное распределения размеров гранул. Характеризуется оно следующим образом: бимодальное распределение – наличием гранул с двумя характерными размерами в общей массе продукта, и для полимодальное распределение – гранулы формируются с несколькими характерными размерами.

Для определения максимально эффективного способа подачи жидкого связующего компонента в смеситель-гранулятор был поставлен ряд экспериментов. Для чего в смеситель-гранулятор тарельчатого типа производили подачу связующего компонента тремя способами: капельным, форсуночным и наливным.

Результаты плотности распределения гранул от способа подачи жидкого связующего компонента при использовании в качестве порошкообразной смеси – смеси картофельного крахмала и сахарной пудры, представлены на рисунке 3.4.

Анализируя гистограмму плотности распределения частиц по размерам и линии тренда, полученные полиномом 6 степени, можно утверждать, что при использовании капельного способа подачи жидкого связующего компонента (соответствует 1 гистограмме и линии тренда) получаются гранулы с большим разбросом среднего размера. При этом, исходя из кривого распределения (линии тренда), можно сказать, что большая часть гранул имеет три средних размера: 0,5; 2; 4 мм, то есть характер распределения размеров гранул полимодальный. Этот результат не может быть принят как удовлетворительный, так как среднемодальный размер гранул должен быть равен $3 \pm 0,5$ мм. Это объясняется большим количеством центров зародышей образования гранул. При этом размеры жидкого компонента при капельном способе подачи имеют большой разброс, что влияет на размер конечных гранул. Кроме того, капельный способ не позволяет равномерно распределять жидкий связующий компонент в массе смеси, а учитывая невысокую степень турбулизации порошкообразной смеси при

использовании смесителя-гранулятора тарельчатого типа, это приводит к образованию неравномерных центров агломерации – зародышей гранул, и как следствие получение гранул с различными размерами.

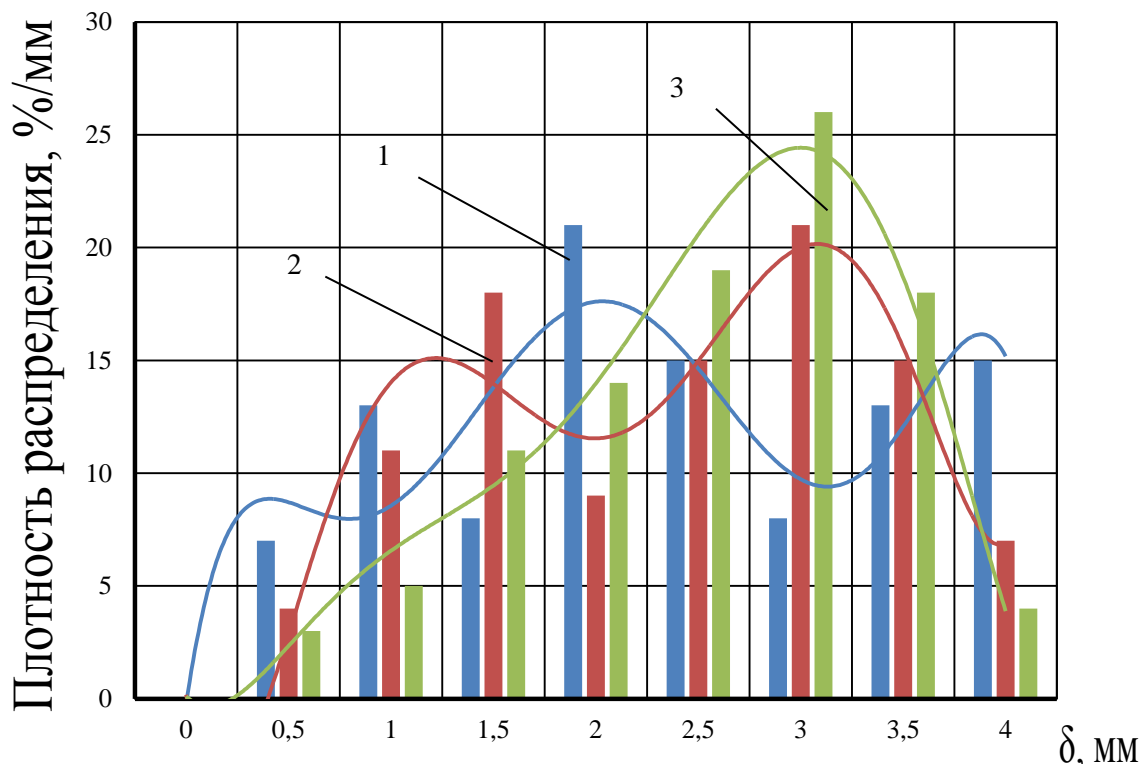


Рисунок 3.4 – Гистограмма плотности распределения частиц по размерам: 1 – капельный способ подачи связующего компонента; 2 – форсуночный способ подачи связующего компонента; 3 – наливной способ подачи связующего компонента

Используя форсуночный способ подачи компонентов, возможно получать близкие по размеру частицы жидкого связующего компонента. Но учитывая низкую степень турбулизации смеси внутри рабочей камеры тарельчатого смесителя-гранулятора, это ведет к образованию двух средних размеров готовых гранул: 1,5 и 3 мм. При этом использование активатора, который дополнительно турбулизует рабочую среду и разрушает крупные агломерации, не дает большей эффективности.

Распределение размеров гранул при использовании форсуночного способа подачи жидких компонентов соответствует бимодальному распределению. То

есть в результате гранулирования получаются гранулы, близкие к двум среднемодальным размерам.

Используя третий способ подачи жидкого связующего компонента – наливной, размеры готовых гранул близки к 3 мм, о чем свидетельствует гистограмма плотности распределения частиц и полученная линия тренда.

Способ осуществлялся при помощи диска, расположенного на дне тарели в зоне 12 часов. Диск расположен на расстоянии 3 мм от отбортовки тарели, имеет острую кромку и вращается в сторону, противоположную вращению тарели. Жидкие связующие компоненты подаются на верхнюю поверхность диска при помощи устройства подачи. Дисперсная порошкообразная среда смеси налипает на поверхность связующего компонента и непрерывно срезается ножом, отбрасывая полученную смесь на активатор. Активатор разрушает крупные агломерации и, попадая в среду порошкообразной смеси, происходит дальнейшее окатывание зародышей гранул с образованием готовых гранул.

Общий вид смесителя-гранулятора с наливным способом подачи связующего компонента представлен на рисунке 3.5.

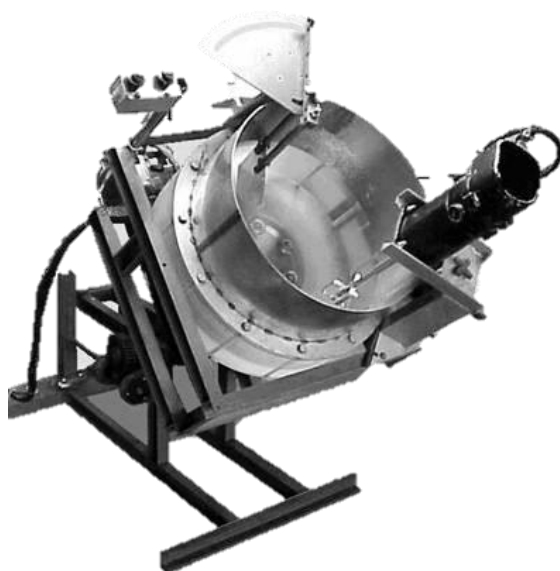


Рисунок 3.5 – Общий вид смесителя-гранулятора

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. Что намного выше, чем при использовании других способов подачи жидкого связующего компонента, но наличие гранул с размерами менее 2,5 мм в количестве 33 % от общей массы готового продукта также является неудовлетворительным результатом. Из этого следует, что необходимо определить режимные параметры работы смесителя-гранулятора тарельчатого типа, позволяющие получать гранулы с размерами $3\pm 0,5$ мм более чем в 80 % от общей массы готовой продукции.

3.3 Анализ факторов, влияющих на процесс гранулирования в смесителе-грануляторе тарельчатого типа

Как отмечалось выше, процесс гранулирования является сложным механическим процессом, на который оказывают влияние как конструктивные, так и эксплуатационные параметры смесителя-гранулятора. Кроме того, в данной конструкции предусмотрен наливной способ подачи жидкого связующего компонента, что усложняет анализ процесса и определение конечных параметров готовой продукции.

Важными выходными параметрами процесса гранулирования являются: среднемодальный размер гранул (большее количество гранул с требуемыми размерами $3\pm 0,5$ мм), затраты мощности на процесс гранулирования (важный параметр экономической эффективности).

Учитывая это, были выбраны факторы, которые оказывают наибольшее влияние на выходные параметры процесса.

К таким факторам относятся: частота вращения тарели n_T , об/мин; частота вращения активатора n_A , об/мин; частота вращения диска n_P , об/мин; амплитуда колебания активатора A_A , мм; частота колебаний активатора ν , Гц.

Увеличение частоты вращения тарели и активатора приводит к увеличению турбулентности внутри рабочей камеры гранулятора, что способствует более равномерному смешению сухих компонентов, увеличению вероятности налипания частиц сухой смеси на зародыш ядра гранулы и упрочнению гранулы. Однако повышение частоты вращения влечет увеличение затрат мощности, что приводит к перерасходу энергии, сказываясь на экономической эффективности процесса.

Повышение частоты вращения диска приведет к увеличению ядер зародышей гранул, но при этом может привести к их слипанию, так как будет недостаточно времени для их покрытия сухой смесью. В результате чего будут образовываться крупные агломерации. При низкой частоте вращения диска процесс гранулирования будет более продолжителен и потребует больших энергозатрат.

Частота и амплитуда колебаний активатора напрямую влияют на процесс разрушения крупных агломераций и формирования гранул заданных размеров. Кроме того, данные факторы оказывают влияние на уплотнение вновь напыляемых сухих компонентов на ядро гранулы и, следовательно, на прочность готового продукта. Также увеличение значений величин данных факторов влечет увеличение энергозатрат, что свидетельствует о том, что их увеличение имеет определенный предел, обусловленный экономической эффективностью процесса гранулирования.

На основании предварительной серии исследований были выбраны уровни и интервалы варьирования перечисленных факторов.

Значение частоты вращения тарели изменялось: $n_T=30; 45; 60$ 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 качестве смеси использовался картофельный крахмал и сахарная пудра, в качестве жидкого связующего компонента – концентрированный сок черники (содержание сухих веществ в концентрированном соке $C_{\text{сух.}}=35-40$ % масс.).

Методика проведения эксперимента приведена в Главе 2. По полученным результатам построен ряд характерных графиков (рисунки 3.6 – 3.10).

Первые исследования проводились при минимальных значениях частоты вращения тарели гранулятора $n_T=30$ об/мин и диска для распыла вязкого связующего $n_P=15$ об/мин ввиду минимальных энергозатрат и выявления характера влияния активатора на процесс зарождения и уплотнения гранул, так как литературно-патентный обзор показал, что именно он оказывает возмущающее воздействие на гранулируемую среду и способствует интенсификации процесса.

Сравнение графиков 3.6 и 3.7 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. О чем свидетельствует линия 3, соответствующая значению амплитуды 2,5 мм, которая отражает значения среднемодального размера 1,5 и 2,1 мм при максимальном значении частоты колебаний активатора 50 Гц при частоте вращения вала активатора 1200 и 600 об/мин соответственно.

Поэтому на следующем графике 3.8 приводим зависимость среднемодального размера частиц от частоты вращения активатора при частоте его колебаний в 20 Гц. И видим подтверждение вышесказанного, что не только высокие значения частоты колебаний активатора приводят к снижению среднемодального размера частиц, но и непосредственно частота вращения активатора также этому способствует. Посмотрев на линии 1, 2, 3 на графиках 3.6–3.8, нельзя не отметить, что в интервал оптимальных значений среднемодального размера частиц попадает линия 2, соответствующая амплитуде колебаний активатора 1,5 мм. Используя данное значение рассматриваемого параметра активатора, возможно получение гранул размером 2,3–3,7 мм при прочих других параметрах, что соответствует поставленной цели, нежели прямые 1 и 3.

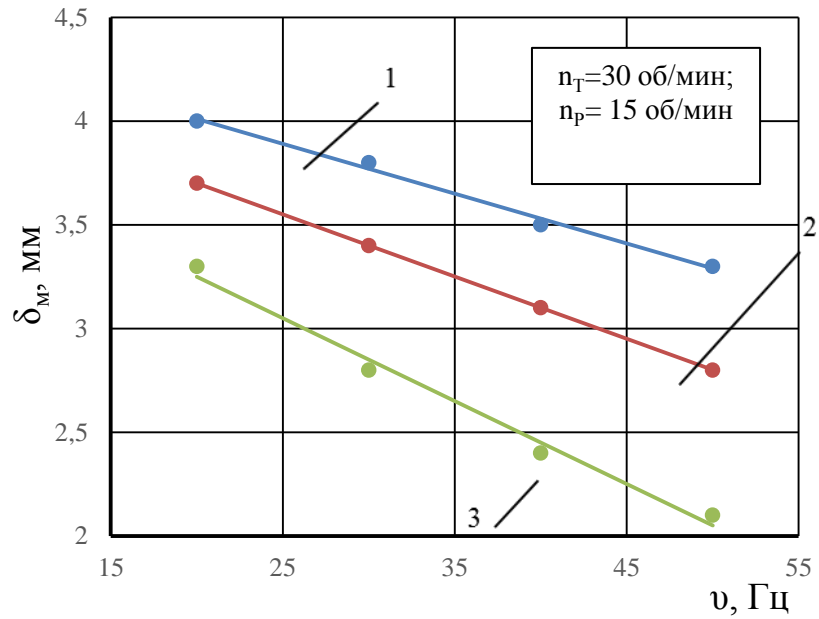


Рисунок 3.6 – Зависимость среднемодального размера частиц от частоты колебаний активатора при частоте вращения активатора 600 об/мин:

1 – $A_A = 0,5$ мм; 2 – $A_A = 1,5$ мм; 3 – $A_A = 2,5$ мм

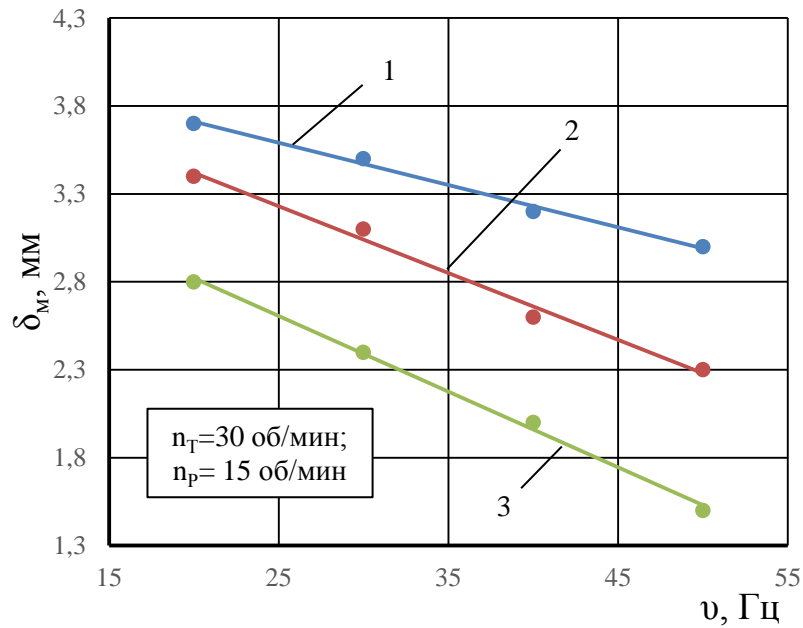


Рисунок 3.7 – Зависимость среднемодального размера частиц от частоты колебаний активатора при частоте вращения активатора 1200 об/мин:

1 – $A_A = 0,5$ мм; 2 – $A_A = 1,5$ мм; 3 – $A_A = 2,5$ мм

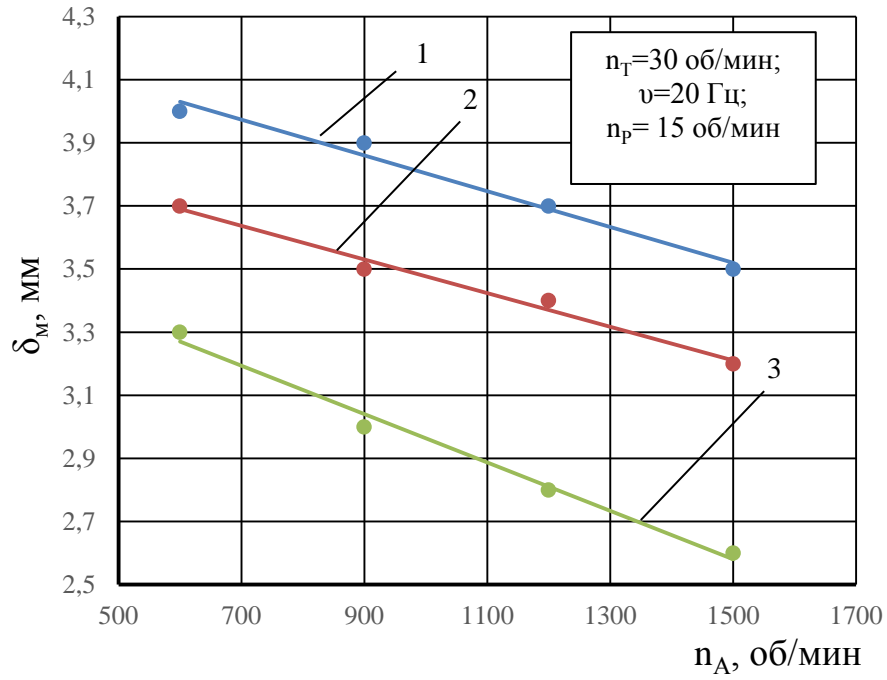


Рисунок 3.8 – Зависимость среднемодального размера частиц от частоты вращения активатора: 1 – $A_A=0,5$ мм; 2 – $A_A=1,5$ мм; 3 – $A_A=2,5$ мм

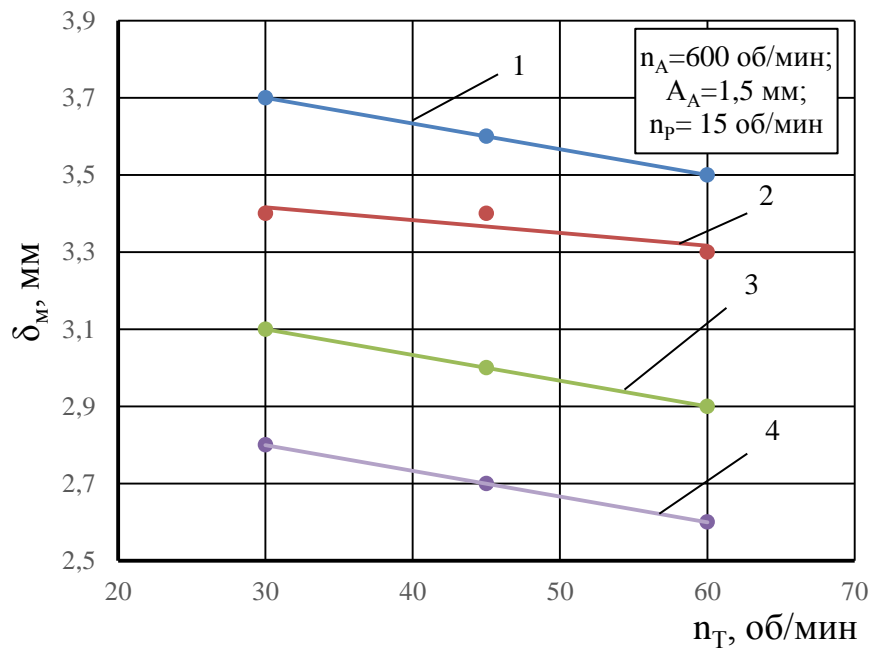


Рисунок 3.9 – Зависимость среднемодального размера частиц от частоты вращения тарели: 1 – $\nu=20$ Гц; 2 – $\nu=30$ Гц; 3 – $\nu=40$ Гц; $\nu=50$ Гц

Также согласно рисунку 3.8 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.

Графики 3.9 и 3.10 наглядно демонстрируют слабое влияние частот вращения самой тарели гранулятора и диска для распыла вязкого связующего на среднемодальный размер частиц – всего в пределах десятых долей миллиметра.

Увеличение значения скорости вращения тарели не показало существенного влияния на процесс формирования гранул и его интенсификацию, кроме повышения энергопотребления.

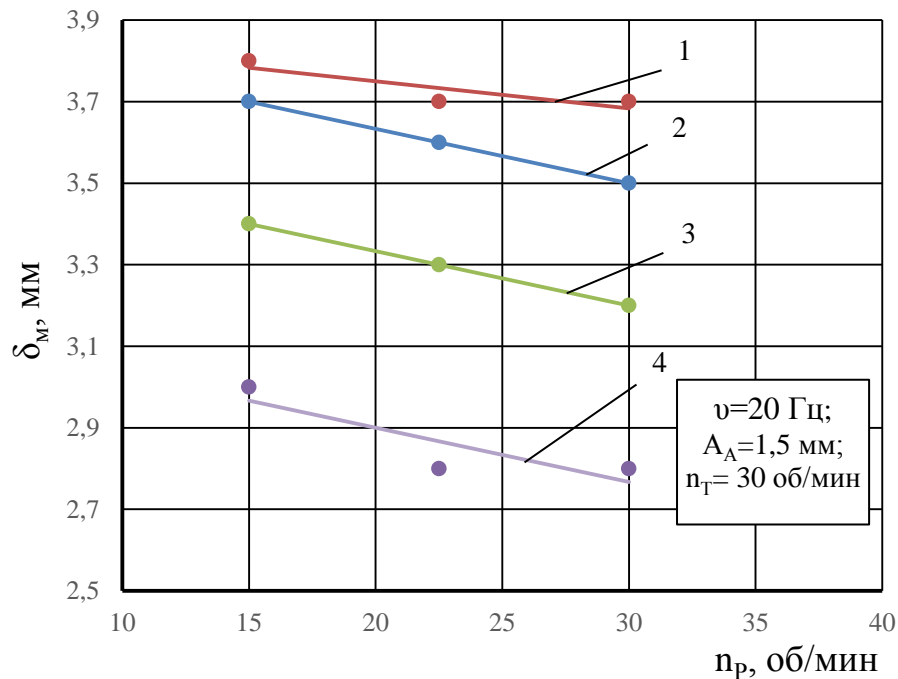


Рисунок 3.10 – Зависимость среднемодального размера частиц от частоты вращения диска: 1 – $n_A=600$ об/мин; 2 – $n_A=900$ об/мин; 3 – $n_A=1200$ об/мин; 4 – $n_A=1500$ об/мин

Вращение диска подачи жидкого связующего компонента не ведет к турбулизации порошкообразной смеси внутри смесителя-гранулятора. А скорость сбрасывания зародышей зерен гранул с поверхности диска практически не оказывает влияния на наложение новых слоев на поверхность гранул. Поэтому

можно вести процесс гранулообразования при минимальных значениях как данного параметра, так и частоты вращения тарели, ввиду того, что их увеличение приводит только к увеличению энергозатрат, не оказывая должного влияния на среднемодалный размер гранул.

Активатор, как показали графики, напротив, оказывает решающее действие на образование гранул и их среднемодалный размер. Так, увеличение частоты вращения активатора ведет к разрушению образующихся агломераций, а при высоких значениях и к переизмельчению гранул (рисунки 3.6–3.8). Ввиду этого ведение процесса при высоких значениях частоты вращения активатора 1200–1500 об/мин приведет к меньше требуемого размеру гранул при неоправданно больших значениях потребления энергии.

Частота и амплитуда колебаний активатора также оказывают существенное влияние на формирование гранул и их среднемодалный 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, при этом возможны бимодальная или полимодальная схемы распределения размеров готовых гранул, что является недопустимым.

На основании анализа полученных графиков предварительно можно сделать вывод о том, что для поддержания выхода гранул размером $3 \pm 0,5$ мм при минимальных затратах мощности на процесс гранулирования следует осуществлять работу тарельчатого смесителя-гранулятора с вибрационным активатором при следующих значениях исследуемых параметров: частота вращения тарели – $n_T = 30$ об/мин; частота вращения активатора – $n_A = 900$ об/мин; частота вращения диска – $n_D = 15$ об/мин; амплитуда колебания активатора – $A_A = 1,5$ мм; частота колебаний активатора – $\nu = 20$ Гц. Однако для подтверждения и уточнения полученных выводов, а также возможности прогнозирования свойств получаемого продукта на разработанном аппарате необходимо воспользоваться методами математического моделирования.

3.4 Математические модели и оптимизация процесса

Как было определено в разделе 3.3, основными факторами, влияющими на процесс гранулирования в смесителе-грануляторе, являются: 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, и частота колебаний активатора ν , Гц.

Каждый из этих факторов в большей или меньшей степени влияет на выходные параметры – среднемодальный размер гранул δ_m , мм, и затраты мощности N , Вт. Для определения экономической эффективности процесса корректнее воспользоваться отношением полезной мощности, идущей на процесс смешивания и гранулирования, к полной затраченной мощности $(N_{\text{полез.}}/N_{\text{полн.}}) \times 100, \%$.

Анализ графиков раздела 3.3 показал, что параметры работы активатора оказывают наибольшее влияние на процесс, но при этом нельзя отбрасывать следующие факторы – частоту вращения тарели и частоту вращения диска, так как их значения поддерживают стабильность ведения процесса. Оценить аналитическим путем влияние каждого фактора и их взаимное влияние на процесс затруднительно. Решение данной задачи может быть осуществлено с применением метода ортогонального планирования эксперимента, для чего необходимо построить регрессионную модель на основе полученных экспериментальных данных.

Для этого были выбраны уровни и интервалы варьирования факторов, представленные в таблице 3.3.

В результате проведения серии экспериментов (выборка экспериментальных данных приведена в Приложении В) и обработки полученных данных были найдены регрессионные уравнения зависимости среднемодального размера гранул от частоты вращения тарели, частоты вращения активатора, частоты вращения диска, амплитуды колебания активатора и частоты колебаний

активатора. А также зависимость отношения полезной мощности к полной от этих же факторов.

Таблица 3.3 – Условия проведения эксперимента

Фактор	Обозначение факторов	Уровни		Центр эксперимента	Шаг варьирования
		нижний	верхний		
Частота вращения тарели n_T , об/мин	C1	30	60	45	15
Частота вращения активатора n_A , об/мин	C2	600	1500	1050	300
Частота вращения диска n_p , об/мин	C3	15	30	22,5	7,5
Амплитуда колебания активатора A_A , мм	C4	0,5	2,5	1,5	1
Частота колебаний активатора ν , Гц	C5	20	50	35	10

Значимость коэффициентов проверяли с помощью t-критерия [73; 74; 99; 114].

$$\delta_M = 5,02 - 0,0037 \times C1 - 0,00076 \times C2 - 0,00127 \times C3 - 0,3559 \times C4 - 0,02 \times C5, \quad R=96,3; \quad (3.1)$$

$$N_{\text{поллез.}}/N_{\text{полн.}} = 36,99 - 0,032 \times C1 - 0,0078 \times C2 - 0,105 \times C3 - 2,41 \times C4 - 0,07 \times C5, \quad R=97,6; \quad (3.2)$$

где C1 – частота вращения тарели, об/мин;

C2 – частота вращения активатора, об/мин;

C3 – частота вращения диска, об/мин;

C4 – амплитуда колебания активатора, мм;

C5 – частота колебаний активатора, Гц;

R – коэффициент множественной регрессии, который показывает, насколько точно полученные уравнения описывают экспериментальные данные.

Анализ уравнений 3.1 и 3.2 показывает, что на процесс гранулирования в большей степени оказывают влияние факторы, связанные с параметрами вибраций активатора. При этом данные факторы также оказывают большее влияние на КПД процесса. Необходимо отметить, что полученные регрессионные уравнения не содержат межфакторного взаимодействия, о чем свидетельствуют отсутствующие коэффициенты в уравнениях.

С целью нахождения рациональных параметров процесса гранулирования необходимо определить значения факторов, при которых значение среднемодального размера получаемых гранул составит 3 мм, а затраты мощности будут минимальными, для чего воспользовались методом Ньютона – итерационным численным методом нахождения корня заданной функции [55]. Определение рациональных параметров процесса проводилось в программной среде Statistica 12. В результате были получены следующие уточненные значения независимых факторов, представленные в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Рациональные параметры процесса

Частота вращения тарели n_T , об/мин	Частота вращения активатора n_A , об/мин	Частота вращения диска n_P , об/мин	Амплитуда колебания активатора A_A , мм	Частота колебаний активатора ν , Гц
32	980	20	1,7	25

При подстановке полученных значений из таблицы 3.4 в уравнения 3.1 и 3.2, получили следующие результаты:

$$\delta_m = 5,02 - 0,0037 \times 32 - 0,00076 \times 980 - 0,00127 \times 20 - 0,3559 \times 1,7 - 0,02 \times 25 = 3,026,$$

$$N_{\text{полез.}}/N_{\text{полн.}} = 36,99 - 0,032 \times 32 - 0,0078 \times 980 - 0,105 \times 20 - 2,41 \times 1,7 - 0,07 \times 25 = 20,375.$$

Значение среднемодалного размера составило 3,026 мм, а отношение полезной мощности к полной – 20,375 %.

Полученные значения (таблица 3.4) соответствуют средним значениям исследуемых интервалов параметров в разделе 3.2.

В случае подстановки минимальных значений параметров: $n_T=30$ об/мин, $n_A= 600$ об/мин, $n_P= 15$ об/мин, $A_A=0,5$ мм, $\nu=20$ Гц; получаем значение среднемодалного размера гранул 3,86 мм при значении отношения $N_{\text{полез.}}/N_{\text{полн.}}=27,17$ %. При больших энергетических затратах получаем слишком большой среднемодалный размер гранул.

В случае подстановки максимальных значений параметров: $n_T=60$ об/мин, $n_A= 1500$ об/мин, $n_P= 30$ об/мин, $A_A=2,5$ мм, $\nu=50$ Гц; получаем значение среднемодалного размера гранул 1,73 мм при значении отношения $N_{\text{полез.}}/N_{\text{полн.}}=10,69$ %. Получаем размер гранул значительно меньше нужного размера при меньших энергетических затратах.

Следует вывод: рациональные параметры, полученные при обработке данных в программной среде Statistica 12, максимально соответствуют достижению поставленной цели.

Для оценки адекватности полученных результатов при математической обработке данных был поставлен эксперимент со значениями независимых факторов, полученными при оптимизации. В результате полученные значения среднемодалного размера гранул и $N_{\text{полез.}}/N_{\text{полн.}}$ не отличались от расчётных более, чем на 5 %.

3.5 Математическая модель напряжений в зоне работы активатора

Результаты анализа взаимодействия лопасти с несвязным слоем гранулированного продукта были изложены в трудах «*Annular shear cell desing and*

operation: considerations arising from some detailed studies» J. Bridgwater и D. F. Bagster.

В работе представлена взаимосвязь силы, действующей на слой структурированного продукта, со следующими факторами: скоростью вращения лопасти активатора; массой слоя материала; фрикционными свойствами слоя материала, зазором между лопастями. В результате анализа полученных значений была представлена математическая модель силы взаимодействия активатора с продуктом при перемещении лопасти через слой несвязанных частиц во влажном состоянии. Математический вид данного взаимодействия представлен уравнением:

$$\frac{F_H}{\rho_P(1-\varepsilon_b)gh_I^2L_I} = f\left(\frac{Z}{h_I} \cdot \frac{L}{h_I} \cdot \frac{W_f}{h_I} \cdot \Theta_f \cdot \frac{v_I^2}{gh_I} \cdot \varphi_I \cdot \Theta_P \cdot \Theta_W \cdot \varepsilon_b\right), \quad (3.3)$$

где ρ_P – плотность гранул,

L – длина лопасти,

Z – погружение лопасти (определяется как расстояние по вертикали от низа лопасти до ненарушенной поверхности слоя частиц),

W_f – высота зазора между основанием лопасти и дном,

Θ_f – динамический угол трения между гранулами и внутренней поверхностью днища тарели,

v_I – линейная скорость лопасти,

φ_I – угол наклона лопасти,

Θ_P – угол внутреннего трения,

Θ_W – угол трения стенки (гранула-лопасть),

ε_b – пористость слоя частиц / гранул.

По результатам анализа безразмерная горизонтальная сила, $\frac{F_H}{\rho_P(1-\varepsilon_b)gh_I^2L_I}$ зависит от следующих безразмерных групп:

- $\frac{Z}{h_I}$ и ε_b – которые отражают влияние веса статического зернистого слоя, поддерживаемого лопастью активатора;
- $\frac{W_f}{h_I}$ и θ_f – которые отражают создание эффекта зазора между лопастью и внутренней поверхностью дна тарели;
- $\frac{v_I^2}{gh_I}$ – которые отражают создание инерционного движения через зернистый слой частиц;
- θ_P и θ_W – которые отражают влияние фрикционных свойств слоя материала;
- φ_I – которая отражает эффект угла наклона лопасти относительно горизонтальной плоскости.

R. M. Nedderman произвел моделирование эффекта трения и статического веса, используя Кулоновский метод клиньев для статической силы несвязного материала на вертикальной поверхности [72]. Для определения величины силы, направленной в противоположную сторону от лопасти для горизонтальной силы на единицу длины лопасти, было предложено следующее выражение:

$$\frac{F_H}{L_I} = \frac{1}{2} \rho_P \cdot K_P (1 - \varepsilon_b) g (h_I^2 + 2H_S h_I), \quad (3.4)$$

где H_S – высота надбавки слоя зернистого материала,

K_P – коэффициент пассивного отказа.

Коэффициент пассивного отказа, или, точнее, соотношение между горизонтальной и вертикальной силами, действующими на лопасть, является функцией углов внутреннего трения и трения стенок, а также угла наклона лопасти [72].

Инерционная составляющая горизонтальной силы на единицу длины лопасти из анализа размеров приведена в уравнении 3.3.

$$\frac{F_H}{L_I} = \rho_P \cdot \alpha_I (1 - \varepsilon_b) (v_I^2 / h_I), \quad (3.5)$$

где α_I – константа пропорциональности, определенная экспериментально и полученная *J. Bridgwater* и *D. F. Bagster*.

Экспериментальное измерение вектора силы на вертикальное перемещение лопасти через зернистый слой, выполненное авторами с использованием специального устройства для измерения силы, показало, что сила, вызванная движением лезвия (выше $\sim 0,25$ м/с), практически не зависит от значений трения и, следовательно, от фрикционных свойств гранулированного слоя материала. С другой стороны, при низких скоростях (до $\sim 0,25$ м/с) они обнаружили, что сила не зависит от скорости и, следовательно, от инерционной группы. В этом диапазоне скоростей статический вес и влияние трения на силу являются доминирующими. *J. Bridgwater* и *D. F. Bagster* также использовали уравнение 3.4 (без эффекта надбавки) для получения полуэмпирической корреляции между безразмерной силой и фрикционными свойствами.

Однако данная модель применима для лопасти, перемещающейся в слое зернистого материала без совершения дополнительного возвратно-поступательного движения, создающего вибрационное воздействие. На рисунке 3.10 а представлена модель движения частиц в зоне действия активатора. На рисунке 3.10 б представлен сегмент лопасти активатора с расстановкой векторов скоростей движения частиц в зоне действия рабочего органа.

В результате обработки полученных данных, а также математического моделирования процесса, была получена модель следующего вида, учитывающая сложное движение рабочего органа через слой зернистого материала:

$$\frac{F_H}{\rho_P (1 - \varepsilon_b) g h_I^2 L_I} = f \left(\frac{Z}{h_I} \cdot \frac{L}{h_I} \cdot \frac{W_f}{h_I} \cdot \theta_f \cdot \frac{\left(\frac{\pi \cdot n_A \cdot r_A}{30} - \sqrt{\frac{4}{3} g l \left(\sin \alpha - \frac{2\delta}{H} \cos \alpha \right) + v_0^2} \right)^2 + (A_A \cdot \vartheta_A)^2}{g h_I} \cdot \varphi_I \cdot \theta_P \cdot \theta_W \cdot \varepsilon_b \right), \quad (3.6)$$

где r_A – радиус лопасти активатора,
 α – угол наклона тарели,
 A_A – амплитуда колебаний,
 ϑ_A – частота колебаний,
 n_A – частота вращения активатора,
 g – ускорение свободного падения,
 l – длина пройденного пути,
 δ – коэффициент трения качения,
 H – геометрический размер частицы,
 v_S – начальная скорость частицы.

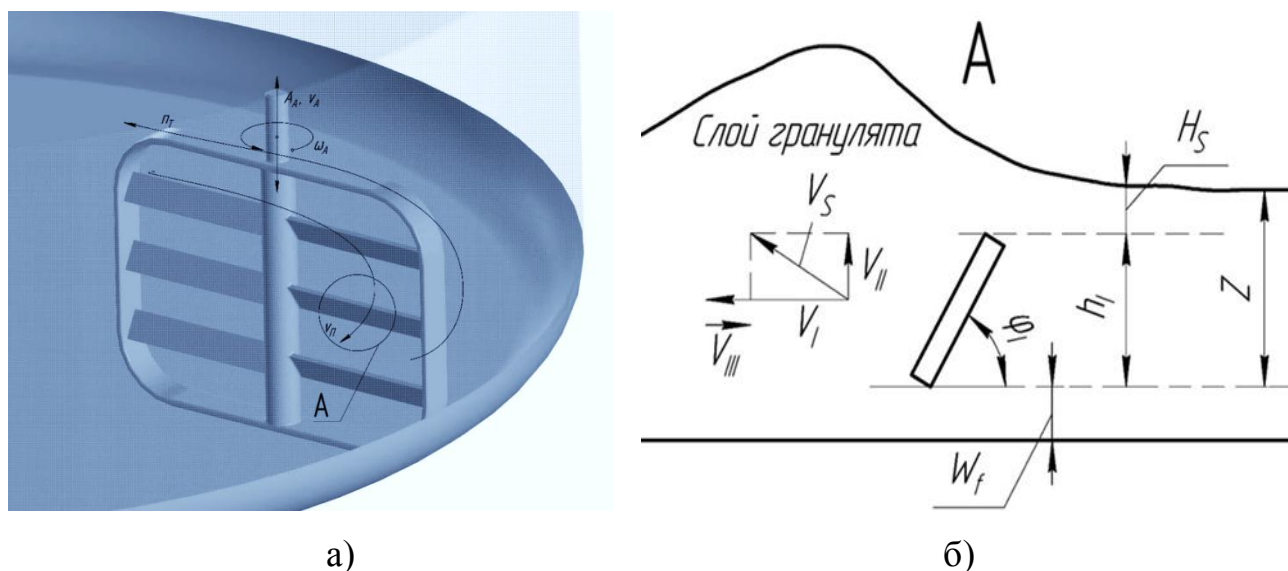


Рисунок 3.10 – Схема движения активатора через слой материала: а) сегмент тарельчатого гранулятора с активатором; б) сегмент лопасти активатора

Величина силы на единицу длины лопасти может быть представлена следующим выражением:

$$\frac{F_H}{L_I} = \frac{\pi \cdot d_a^3}{6} \rho_a \alpha_I \left(\left(\left(\frac{\pi \cdot n_A \cdot r_A}{30} - \sqrt{\frac{4}{3} g l \left(\sin \alpha - \frac{2\delta}{H} \cos \alpha \right) + v_0^2} \right)^2 + (A_A \cdot \vartheta_A)^2 \right) / h_I \right). \quad (3.7)$$

Полученные зависимости в совокупности с результатами исследований Д. Барлетто и М. Полетто позволяют подобрать режимные параметры в зависимости от требуемых среднемодальных размеров гранулята. Процесс структурообразования и разрушения может быть описан через силы взаимодействия между собой.

$$F_H = F_C, \quad (3.8)$$

где F_C – сила сцепления частиц за счет жидких мостиков.

Сила сцепления была описана И.Е. Чернецкой [111]:

$$F_C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{\text{ж}}}{m_k} \cdot \left[\begin{aligned} &r_1 \cdot (C + E) + r'_{12} \cdot (C \cdot (1 - D) - \arcsin(C)) + \\ &+ r'_{22} \cdot (E \cdot (1 - G) - \arcsin(E)) + \\ &+ \frac{d'_a \cdot \cos(\theta_1 + \arcsin(C)) \cdot D}{2} + \\ &+ \frac{d''_a \cdot \cos(\theta_2 + \arcsin(E)) \cdot G}{2} \end{aligned} \right], \quad (3.9)$$

где $\sigma_{\text{ж}}$ – поверхностное натяжение связующего раствора,

θ_1 – краевой угол смачивания частицы диаметра d' ,

θ_2 – краевой угол смачивания частицы диаметра d'' ,

r_1 – радиус окружности сопряжения,

r'_{12} , r'_{22} – радиусы кривизны мениска рассматриваемой части жидкостного кольца меньшей и большей дуг поверхности сопряжения для углов φ' и φ'' ,

m_k – коэффициент,

C, D, E, G – коэффициенты, рассчитываемые через следующие зависимости:

$$C = \sin \varphi' = \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{b}{d'_a} + \sin \theta_1\right) \cdot \left(\cos \theta_1 - \frac{2 \cdot r_1}{d'_a}\right)}{\left(1 + \frac{b}{d'_a} + \sin \theta_1\right)^2 + \left(\cos \theta_1 - \frac{2 \cdot r_1}{d'_a}\right)^2}, \quad (3.10)$$

$$D = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi'}, \quad (3.11)$$

$$E = \sin \varphi'' = \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{b}{d''_a} + \sin \theta_2\right) \cdot \left(\cos \theta_2 - \frac{2 \cdot r_1}{d''_a}\right)}{\left(1 + \frac{b}{d''_a} + \sin \theta_2\right)^2 + \left(\cos \theta_2 - \frac{2 \cdot r_1}{d''_a}\right)^2}, \quad (3.12)$$

$$G = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi''}, \quad (3.13)$$

$$r'_{12} = \frac{d'_a \cdot \left[1 - \sin(\theta_1 + \varphi') + \frac{b}{2}\right]}{2 \cdot \sin \varphi'}, \quad (3.14)$$

$$r'_{22} = \frac{d''_a \cdot \left[1 - \sin(\theta_2 + \varphi'') + \frac{b}{2}\right]}{2 \cdot \sin \varphi''}. \quad (3.15)$$

Подставляя значения из уравнений 3.7 и 3.9–3.15 в 3.8, можно определить среднемодальный размер частиц. Обработка полученных данных позволила установить, что результаты расчетов имеют расхождения с эмпирическими данными не более 5 %.

Повышение давления деформирования массы до 5 МПа приводит к тому, что практически все массы, независимо от начального состояния (разрушенные или агломерированные), приобретают свойства с преобладающим развитием пластических деформаций и хорошо агломерируются.

Анализ физико-химических процессов агрегирования, исследование явлений коалесценции и влагопереноса поровой жидкости из более плотной сердцевины в менее плотные периферийные участки гранулы и привел к мысли интенсифицировать процесс за счет введения вибрационного активатора, обеспечивающего механическое воздействие в виде циклических ударов вращающихся и вибрирующих лопастей.

Воздействуя аналогичным образом на гранулы в различных зонах на тарели гранулятора, можно управлять процессом коагуляционного структурирования гранулы на всех этапах. Подбирая различные формы лопастей, угловые скорости, диаметр описанной окружности, можно регулировать 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.

3.6 Результаты и выводы по главе

1. Анализ свойств сырья, представленного нативным КК и смесью КК с МРК, показал, что увеличение доли МРК в составе смеси ведет к увеличению ее насыпной плотности, сыпучести, количества более мелкой фракции, уменьшению угла откоса и влажности.

2. Исследование существующих способов подачи жидкого связующего в процессе гранулирования позволило сделать выбор в пользу наливного способа, который обеспечивает унимодальное распределение гранул в интервале 3 ± 5 мм согласно полученной гистограмме плотности распределения частиц по размерам при различных способах.

3. Выбраны режимно-технологические параметры тарельчатого смесителя-гранулятора для исследования среднемодального размера гранул и затрат мощности. Выявлено, что для поддержания выхода гранул размером $3 \pm 0,5$ мм при наименьших затратах энергии, гранулирование следует осуществлять при следующих значениях параметров: частота вращения тарели – $n_T = 30$ об/мин; частота вращения активатора – $n_A = 900$ об/мин; частота вращения диска – $n_P = 15$ об/мин; амплитуда колебания активатора – $A_A = 1,5$ мм; частота колебаний активатора – $\nu = 20$ Гц.

4. Получены регрессионные уравнения, адекватно позволяющие оценить степень влияния каждого из рассматриваемых параметров на среднемодальный размер гранул и затраты мощности. Определены рациональные значения: $n_T = 32$, об/мин, $n_A = 980$, об/мин, $n_P = 20$, об/мин, $A_A = 1,7$, мм, $\nu = 25$, Гц, для получения среднемодального размера гранул 3 мм и отношения полезной мощности к полной 20 %:

5. Получена математическая модель, учитывающая сложное движение рабочего органа через слой зернистого материала, позволяющая регулировать скорость и силу удара при подборе различных форм лопастей, угловых скоростей, диаметров описанной окружности.

ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОТОВОГО ПРОДУКТА И ОЦЕНКА РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

4.1 Анализ результатов исследований реологических свойств готового продукта

Исследования реологических свойств инстант-напитков при их растворении в рабочей жидкости проводили на кафедре мехатроники и автоматизации технологических систем Кемеровского государственного университета. Данные исследования необходимы для определения структурно-механических свойств, которые влияют на органолептические показатели, и определения их значения при использовании в рецептуре нативного КК и смеси КК с 5, 10 и 15 % МРК. С целью определения влияния модификации РК на реологические показатели были проведены дополнительно серии экспериментов. На графике 4.1 представлены зависимости напряжений сдвига от скорости сдвига 10 %-ных растворов киселей при варьировании содержания РК.

Из графика видно, что величина зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига для СК 90 % КК и 10 % МРК и КК имеет идентичные значения, это вызвано применением температурной модификации, которая позволяет изменять свойства конечного продукта. При тех же равных условиях возможно получение гранулята с более высокими показателями качества (прочность на истирание, одноосное сжатие и пористость) и теми же органолептическими показателями, как при исходной технологии производства инстантированных напитков.

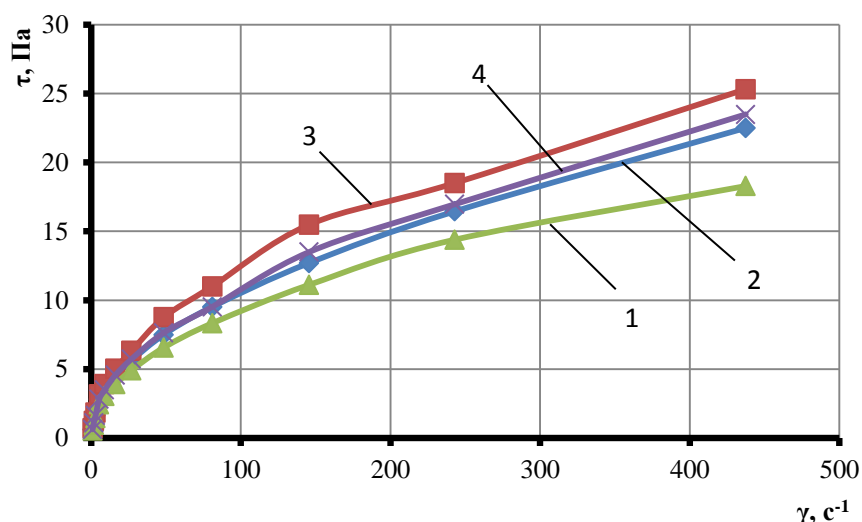


Рисунок 4.1 – Зависимости напряжений сдвига от скорости сдвига 10 %-ных растворов: 1 – СК 95 % КК и 5 % МРК; 2 – СК 90 % КК и 10 % МРК; 3 – СК 85 % КК и 15 % МРК; 4 – 100 % нативный КК

Анализ полученных значений величины напряжения сдвига от скорости сдвига дал значения ниже показателей исходного продукта, что может свидетельствовать о том, что применение температурной модификации исходного сырья позволяет получить необходимые органолептические свойства.

Определить эффективную вязкость полученного раствора можно через параметры напряжения сдвига и скорости сдвига по следующему выражению:

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_{\text{эф}}}, \quad (4.1)$$

где $\eta_{\text{эф}}$ – эффективная вязкость.

На рисунке 4.2 представлены графические зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига. Из графика видно, что при сравнительно низких скоростях ($0\text{--}15\text{ с}^{-1}$) наблюдается значительная разница показателей эффективной вязкости и в случае с СК 5 и 15 % МРК растворами составляет порядка 1,6 раза. При увеличении скорости происходит снижение разности результатов. На графике не указаны значения эффективной вязкости для раствора с 100 %

содержанием нативного КК, поскольку величины были достаточно близкие со СК 90 % КК и 10 % МРК.

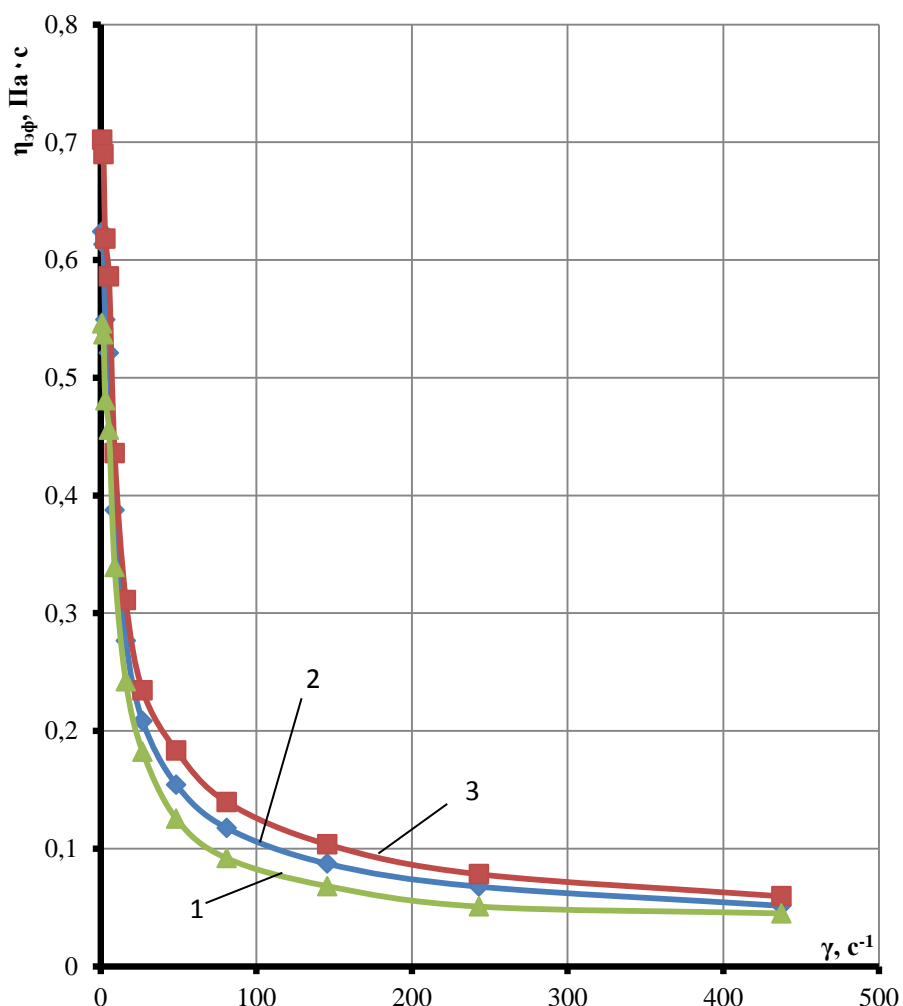


Рисунок 4.2 – Зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига 10 %-ных растворов: 1 – СК 95 % КК и 5 % МРК; 2 – СК 90 % КК и 10 % МРК; 3 – СК 85 % КК и 15 % МРК

Обработка полученных результатов проводилась в программе, разработанной И. А. Литвиновой в Кемеровском государственном университете. Данная программа позволяет установить вид зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига. Для исследуемой жидкости данная зависимость может быть определена по уравнению Оствальда-де-Вилля со следующими коэффициентами:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (4.2)$$

где K – коэффициент консистенции, который зависит от природы материала;
 n – индекс течения.

$$\tau = 0,57 \cdot \dot{\gamma}^{0,62}. \quad (4.3)$$

Повторная серия экспериментов проводилась после остывания растворов до комнатной температуры (20 °С). На рисунках 4.3 и 4.4 представлены зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига для растворов при температуре 20 °С.

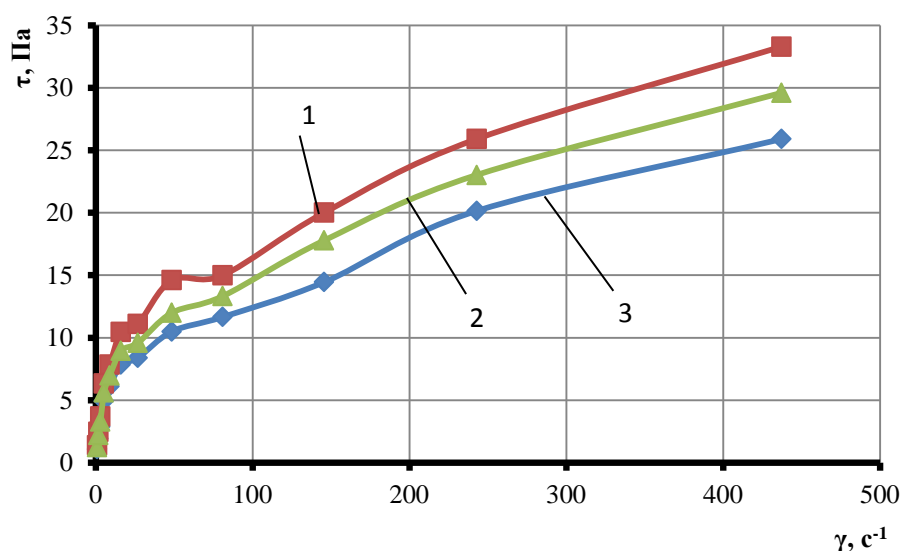


Рисунок 4.3 – Зависимости напряжений сдвига от скорости сдвига 10 % ных растворов при 20 °С: 1 – СК 95 % КК и 5 % МРК; 2 – СК 90 % КК и 10 % МРК; 3 – СК 85 % КК и 15 % МРК

Полученные значения, представленные в виде графических зависимостей на рисунках 4.3 и 4.4, свидетельствуют о сохранении взаимосвязи свойств исследуемых растворов. Значения напряжения сдвига и эффективной вязкости выше, чем в первой серии экспериментов, что объясняется снижением

температуры растворов. Обработка полученных значений по ранее описанной методике позволило получить уравнение Оствальда-де-Вилля со следующими значениями коэффициентов:

$$\tau = 1,83 \cdot \dot{\gamma}^{0,37}. \quad (4.4)$$

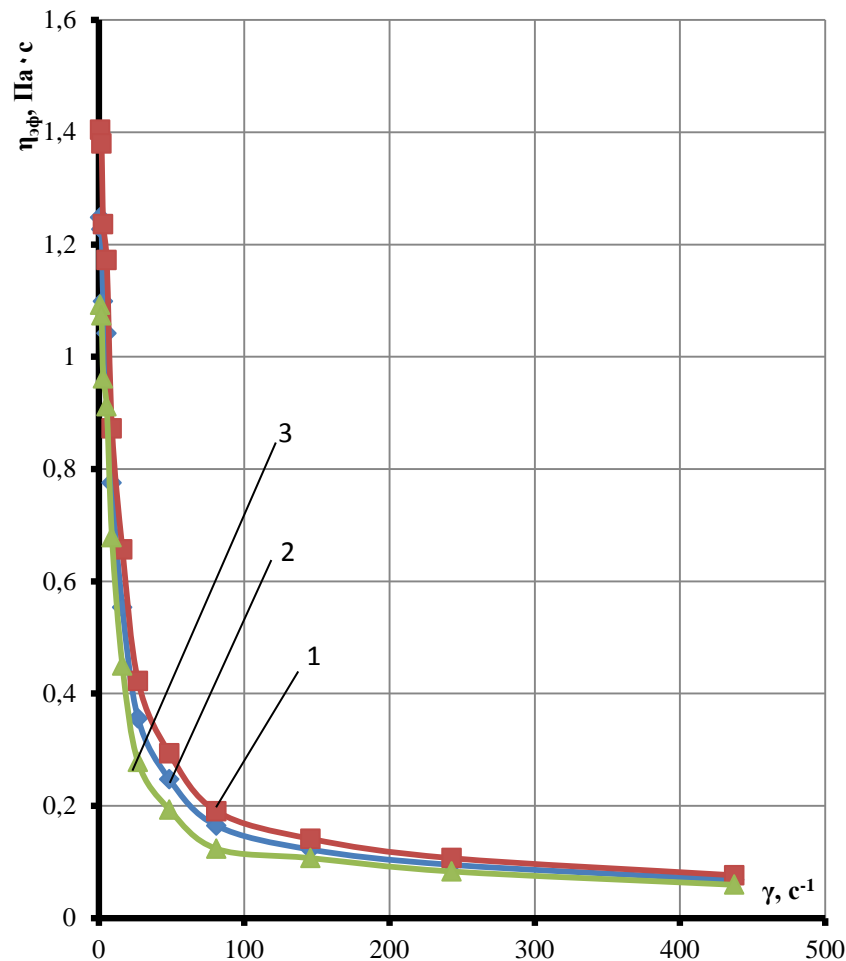


Рисунок 4.4 – Зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига 10 %-ных растворов при 20 °С: 1 – СК 95 % КК и 5 % МРК; 2 – СК 90 % КК и 10 % МРК; 3 – СК 85 % КК и 15 % МРК

Согласно полученным результатам можно сделать вывод, что применение температурной модификации РК, добавленного в количестве 10 % взамен КК (пропорции 1:9) позволяет достичь аналогичных значений параметров

эффективной вязкости и напряжения сдвига при варьировании скорости сдвига, как для раствора, содержащего 100 % нативного КК.

4.2 Анализ результатов исследований распадаемости готового продукта

Методика проведения исследования распадаемости готовой продукции описана в разделе 2.2.3. Исследования проводились в лаборатории компании ООО НПО «Здоровое питание». Величина скорости распадаемости позволяет судить о том, как рабочая жидкость попадает в капилляры гранулы и приводит к тому, что под действием диффузионных процессов происходит разрушение. Стоит отметить, что показатель распадаемости связан с прочностью получаемых гранул при одноосном сжатии и структуры скелета агломерированной частицы. Чем более развита внутренняя поверхность порового пространства, тем быстрее будет проникать рабочая жидкость в нее. Повышение температуры рабочей жидкости было связано с рецептурой приготовления готового инстант-напитка заводом-изготовителем. На рисунке 4.5 представлена зависимость скорости распадаемости от вида СК.

Из графической зависимости видно, что добавление РК не приводит к существенному увеличению времени распадаемости при условии одинаковых величин рациональных параметров ($n_T = 32$ об/мин, $n_P = 20$ об/мин, $n_A = 980$ об/мин; $A_A = 1,7$ мм, $\nu = 25$ Гц). Небольшое различие в параметрах распадаемости связано с малым количеством РК в смеси, а также в применении температурного модифицирования.

На рисунке 4.6 представлена графическая зависимость скорости распадаемости от параметров частоты вращения активатора.

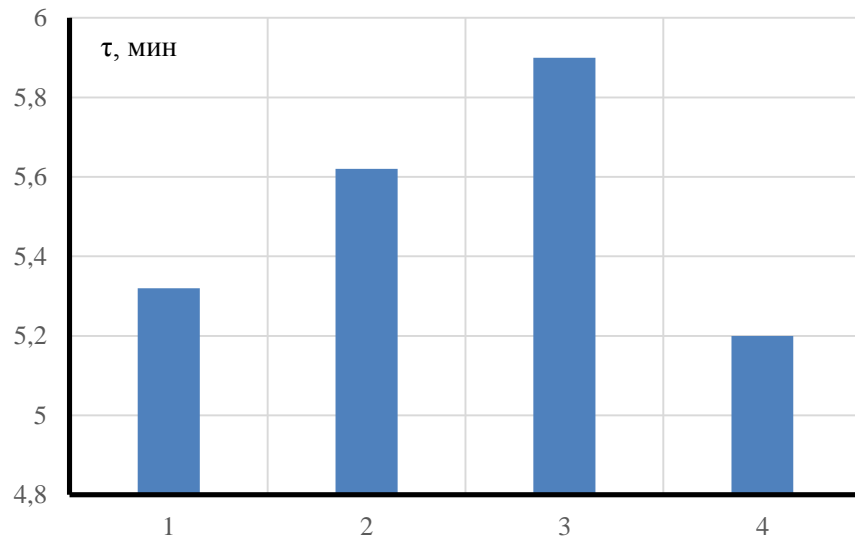


Рисунок 4.5 – Зависимость скорости распадаемости от используемой СК: 1 – СК 95 % КК и 5 % МРК; 2 – СК 90 % КК и 10 % МРК; 3 – СК 85 % КК и 15 % МРК; 4 – 100 % нативный КК

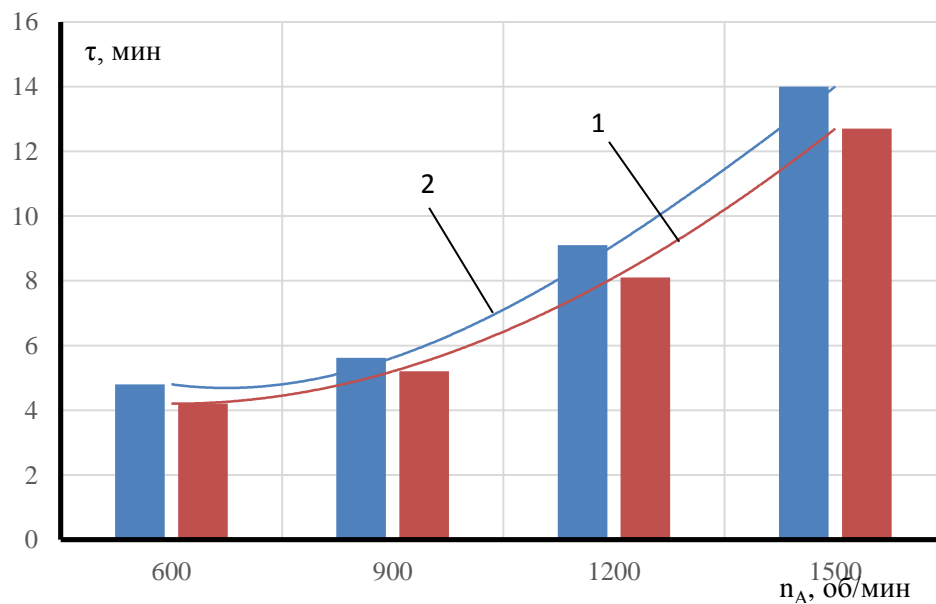


Рисунок 4.6 – Зависимость скорости распадаемости от частоты вращения активатора: 1 – нативный КК; 2 – СК 90 % КК и 10 % МРК

На гистограмме явно выражена зависимость изменения скорости распадаемости от величины прилагаемой нагрузки. При ее увеличении происходит рост времени, при котором происходит разрушение гранулы и проникновение частиц в межсетчатое пространство. При значении 1500 об/мин

время распадаемости составляет порядка 14 минут. Анализ влияния пористости на величину скорости распадаемости имеет аналогичный вид, лишь с небольшими отклонениями. Следовательно, можно заключить, что превышение значения частоты вращения активатора до 1200 об/мин приводит к резкому росту времени распадаемости за счет образования более плотной структуры, которая не позволяет проникать рабочей жидкости в поры гранулы. 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 не только по нескольким параметрам, а по конкретным, которые необходимы при проектировании производства определенного вида продукции. На рисунке 4.7 представлена зависимость распадаемости от величины пористости гранулята. Из графика видно, что при снижении пористости наблюдается резкое увеличение времени проникновения рабочей жидкости в гранулу.

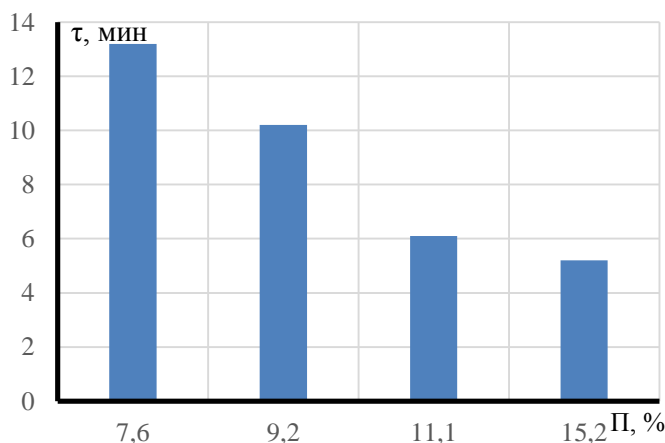


Рисунок 4.7 – Гистограмма зависимости скорости распадаемости от пористости гранулята при рациональных параметрах процесса структурообразования

Взяв во внимание вышесказанное, можно сделать вывод, что варьирование режимных и рецептурных параметров позволяет получать скорость распадаемости в широком диапазоне. Параметр распадаемости зависит от большого количества варьируемых параметров и выходных значений, которые

должны задаваться при проектировании новой технологии или усовершенствовании существующей.

4.3 Результаты исследования статической прочности, пористости и истирания гранул

Разрушение гранул при наложении статической нагрузки или за счет их истирания в процессе трения частиц между собой во время транспортировки нежелательно, поскольку образуется большое количество мелких частиц, а значение среднемодального размера изменяется в меньшую сторону. Следовательно, необходимо свести к минимуму значение истирания гранул, это возможно за счет создания более плотной структуры, например, при использовании прессования. Однако, тогда наблюдается снижение пористости получаемого гранулята и повышение времени их распадаемости и растворения.

Гранулы во влажном состоянии деформируются при воздействии усилия. После проведения процесса сушки гранулы способны разрушаться в хрупком или полухрупком состоянии. Они могут разрушаться при увеличении и распространении микроскопических трещин, образующихся в процессе усадки материала по мере удаления влаги. Сформировавшиеся микротрещины в процессе сушки могут зависеть как от характера проведения процесса удаления влаги и его интенсивности, так и от структурно-механических свойств исходного сырья. При таком разрушении пиковое значение может быть намного меньше, чем присущее значение самой грануле.

Согласно данным, представленным в [27; 46; 51], зона контакта играет существенную роль при определении структуры и самого механизма разрушения частицы. На рисунке 4.8 представлены схемы разрушения частиц при взаимодействии с рабочими органами установки. Методика проведения исследования по истиранию готового гранулята представлена в Главе 2. На

рисунке 4.8 а представлена схема, на которой изображен разлом гранулы на более мелкие частицы. При этом стоит отметить, что происходит разрушение по всему объему гранулы с последующим образованием мелкодисперсных и средней дисперсности частиц.

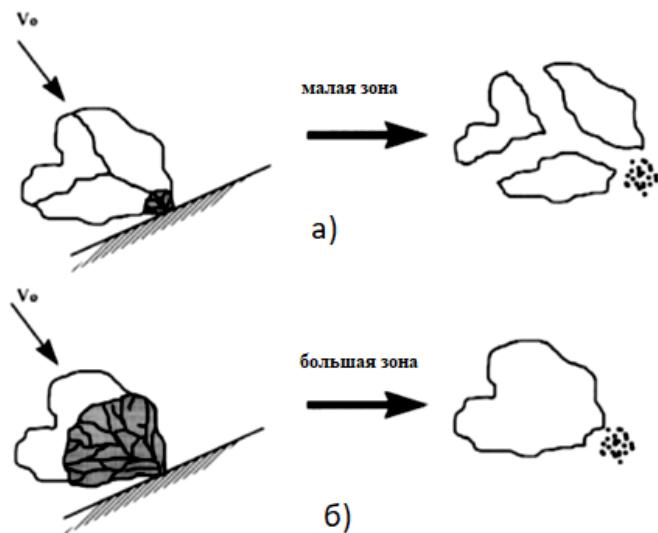


Рисунок 4.8 – Схема разрушения гранулы: а – перелом; б – истирание

При уменьшении технологической зоны меняется и характер разрушения гранулята. В данном случае будет наблюдаться истирание частиц, которое вызвано диффузионными микротрещинами. Такое разрушение частиц сопровождается образованием большого количества мелкодисперсной фракции, которая в конечном счете снижает качество готового продукта (рисунок 4.8, б). Стоит отметить, что при сравнении значений по массе среднемодального размера значение при истирании гранул не оказывает существенного влияния.

Эксперименты по определению истирания готового гранулята проводились в лаборатории на предприятии ООО НПО «Здоровое питание». Величина варьируемых параметров и условия, при которых проводились серии экспериментов и их повторности, соответствуют таблице 3.3. После проведения процесса структурообразования в грануляторе новой конструкции при варьировании режимных параметров производилась классификация и удаление

частиц с размером менее 1 мм. После этого продукт подавался на конвективную сушку при температуре теплоносителя 55 °С.

На рисунке 4.9 представлена зависимость содержания мелкодисперсной фракции в процентном соотношении от амплитуды и частоты колебаний активатора при принятой в качестве наиболее оптимальной СК 90 % КК и 10 % МРК.

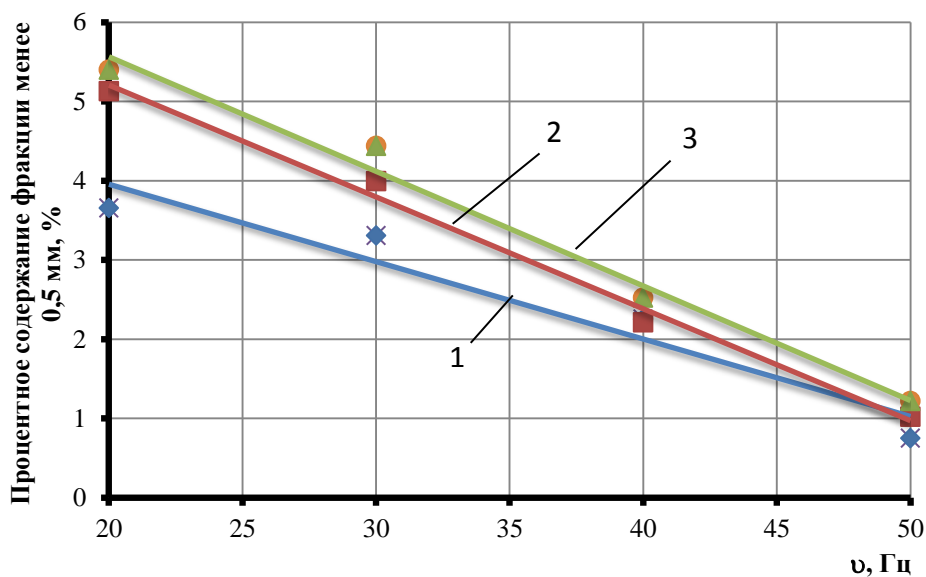


Рисунок 4.9 – Зависимость процентного содержания мелкодисперсной фракции от частоты колебаний при следующих значениях амплитуды ($n_T = 32$ об/мин, $n_P = 20$ об/мин, $n_A = 1200$ об/мин): 1 – $A_A = 0,5$ мм; 2 – $A_A = 1,7$ мм; 3 – $A_A = 2,5$ мм

Согласно полученным значениям можно сделать следующий вывод, что увеличение таких параметров, как частота колебаний и амплитуда активатора оказывают существенное влияние на прочность структуры готовой гранулы. Повышение этих варьируемых параметров приводит к росту прочности на истирание, следовательно, динамическая нагрузка в виде вибрационного поля, накладываемая в зоне, куда перемещаются частицы крупного размера, позволяет разрушать гранулы и уплотнять их структуру. Из графической зависимости видно, что повышение амплитуды в начальный период сопровождается резким ростом прочности получаемого продукта на истирание, а затем происходит снижение значения данной зависимости. Разница между значениями процентного содержания

мелкодисперсной фракции от частоты колебаний при амплитудах 1,7 и 2,5 мм составляет не более 2 %.

На рисунке 4.10 представлена графическая зависимость процентного содержания мелкодисперсной фракции после проведения испытаний по истиранию от частоты вращения активатора при варьировании амплитуды колебаний. Согласно полученным результатам можно заключить, что повышение частоты вращения активатора приводит к росту прочности получаемого гранулята на истирание вследствие наложения высоких значений сдвиговых усилий. Однако не стоит забывать, что при повышении этих значений также наблюдается и уплотнение материала, это приведет к увеличению времени распадаемости и растворения в рабочей жидкости.

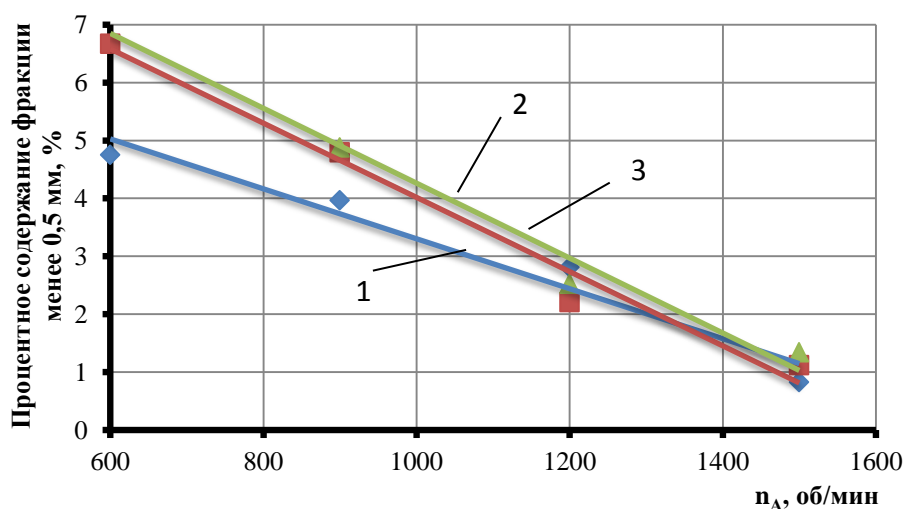


Рисунок 4.10 – Зависимость процентного содержания мелкодисперсной фракции от частоты вращения активатора при следующих значениях амплитуды ($n_T = 32$ об/мин, $n_P = 20$ об/мин, $\nu = 25$ Гц): 1 – $A_A = 0,5$ мм; 2 – $A_A = 1,7$ мм; 3 – $A_A = 2,5$ мм

Еще одним фактором, который необходимо учитывать при этом – это размер получаемых гранул (см. Главу 3). Так при повышении частоты вращения активатора будет наблюдаться снижение среднемодального размера частиц, следовательно, значение прочности на истирание в данных условиях стоит

рассматривать в совокупности с результатами исследования агломерирования части многокомпонентной полидисперсной смеси.

Согласно результатам, полученным в третьей главе, можно установить пороговое значение прочности получаемых гранул на истирание параметром частоты вращения активатора равной 980 об/мин, поскольку при дальнейшем его увеличении будет наблюдаться снижение среднего размера частиц ниже поля допуска, что будет приводить к снижению качества готовой продукции.

Рассмотренные зависимости показывают величину получаемой прочности готовой продукции от значений варьируемых параметров, однако, стоит учитывать и влияние свойств исходного сырья. При использовании РК, который был подвергнут тепловой модификации, в соотношения от 5 до 15 % наблюдался рост значения прочности на истирание.

На рисунке 4.11 представлена зависимость получаемой прочности гранул на истирание при использовании нативного КК и смеси этого крахмала с 10 % МРК.

Согласно полученным значениям можно установить, что использование смеси КК и РК, последний из которых был подвергнут температурной модификации, позволяет получить гранулы, более устойчивые к истиранию при тех же значениях варьируемых параметров. На наш взгляд, данное явление можно объяснить тем, что частицы рисового крахмала имеют большую дисперсность по сравнению с картофельным, следовательно, они могут заполнять пустоты между частицами в структуре гранулы.

С целью определения влияния температурной модификации РК на прочность получаемых гранул на истирание была проведена серия экспериментов, благодаря которым было установлено, что разница получаемого значения прочности гранулята при использовании нативного или модифицированного исходного сырья не дает значительной разности в результатах и лежит в пределах погрешности, поэтому данный способ стоит учитывать при растворении готового продукта в рабочей жидкости.

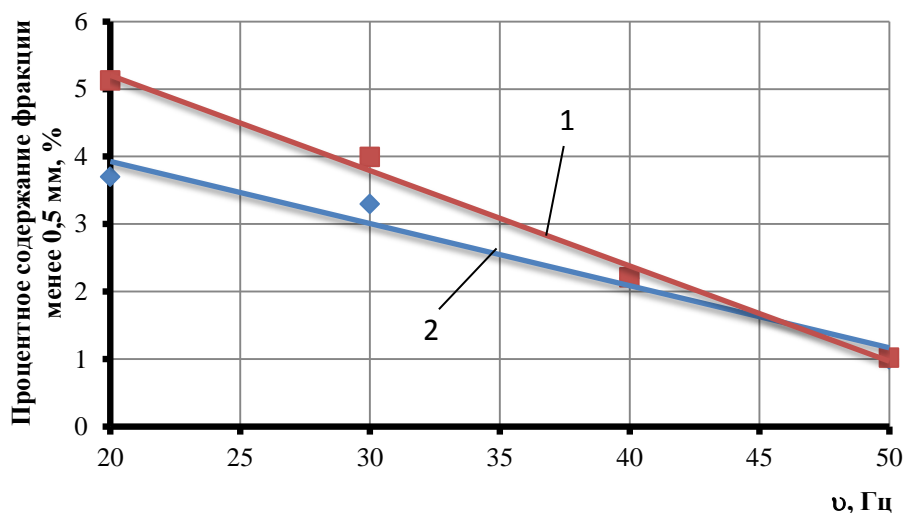


Рисунок 4.11 – Зависимость процентного содержания мелкодисперсной фракции от частоты колебаний активатора ($n_T = 32$ об/мин, $n_P = 20$ об/мин, $n_A = 980$ об/мин, $A_A = 1,7$ мм): 1 – нативный КК; 2 – СК 90 % КК и 10 % МРК

Значение прочности гранул на истирание напрямую зависит от пористости продукта, при этом наблюдается именно обратная зависимость. При повышении прочности гранул на истирание наблюдается снижение пористости готовой продукции и, следовательно, гранулы не будут иметь развитую капиллярную структуру, а процесс распадаемости и растворения в рабочей жидкости будет увеличен. Определение значения пористости получаемых гранул проводили с использованием колбы объемом 100 мл с плотно закрытой резиновой пробкой и микробюреткой на 2 мл с ценой деления 0,02 мл. Для этого использовался пикнометрический метод.

Величина пористости структуры получаемой гранулы определяется через соотношение свободного объема V_C , не заполненного элементарными структурами частиц, к общему объему V :

$$\Pi = \frac{V_C}{V} = 1 - \frac{V_T}{V} = 1 - T, \quad (4.1)$$

где V_T – объем твердого скелета или матрицы,

T – доля объема тела, занятая компактной или твердой частью.

На рисунках 4.12 и 4.13 представлены графические зависимости пористости получаемых гранул от варьируемых параметров процесса структурообразования в тарельчатом грануляторе новой конструкции с использованием СК 90 % КК и 10 % МРК.

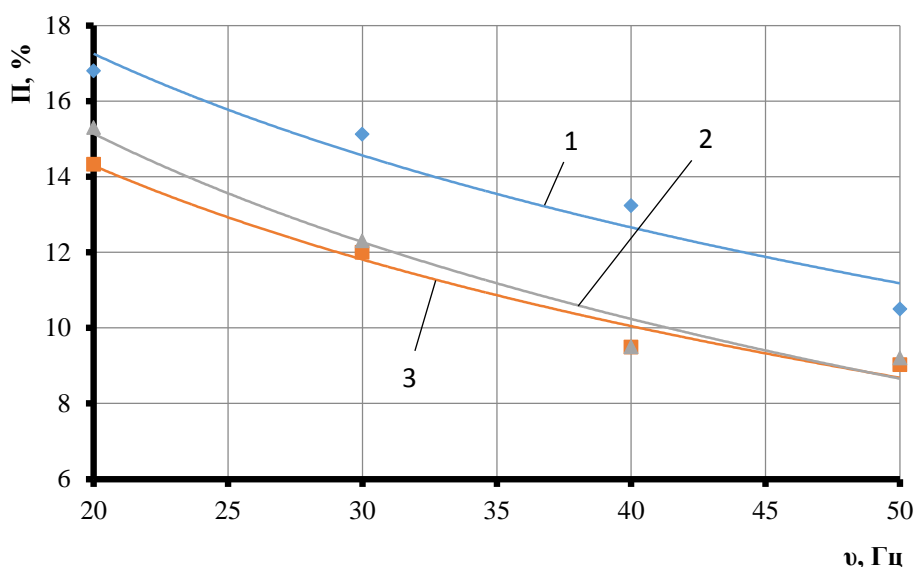


Рисунок 4.12 – Зависимость пористости получаемых гранул от частоты колебаний при следующих значениях амплитуды ($n_T = 32$ об/мин, $n_P = 20$ об/мин, $n_A = 980$ об/мин): 1 – $A_A = 0,5$ мм; 2 – $A_A = 1,7$ мм; 3 – $A_A = 2,5$ мм

Полученные значения явно указывают на уменьшение пористости при увеличении динамических нагрузок. Это связано с уплотнением гранул и деформацией структурного скелета при окатывании. Этот параметр должен учитываться в совокупности с остальными показателями прочности и растворения гранул в рабочей жидкости. Анализ результатов исследования пористости получаемых гранул при использовании нативного КК и смеси с МРК не дал существенных результатов. Показатели пористости гранул из КК хоть и были выше, но значение варьировалось от 0,2 до 3 % в зависимости от режимных и

конструктивных параметров, при которых проводился процесс структурообразования.

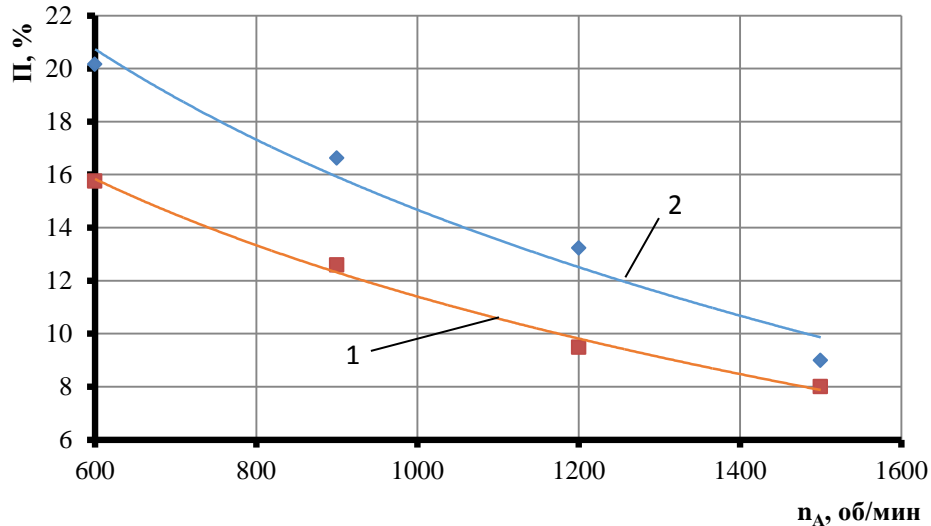


Рисунок 4.13 – Зависимость пористости получаемых гранул от частоты вращения активатора ($n_T = 32$ об/мин, $n_P = 20$ об/мин, $\nu = 25$ Гц): 1 – $A_A = 0,5$ мм; 2 – $A_A = 1,7$ мм

Согласно графику, представленному на рисунке 4.13, пористость гранулы снижается до 8 % при превышении частоты вращения активатора до значения в 1200 об/мин. Это свидетельствует о значительном уплотнении гранулы, что в конечном итоге будет негативно влиять на капиллярное проникновение жидкости в структуру частицы.

Скоростная характеристика процесса приложения нагрузки влияет как на истирание гранул, так и на их износ. Данная характеристика имеет функциональную зависимость. Согласно [110; 130] существует три класса нагрузок, которые могут приводить к истиранию частиц, упругому удару или уплотнению. При истирании или абразивном износе объемная скорость разрушения V_{CV} может быть определена согласно следующему выражению:

$$V_{CV} = \frac{d_i^{0,5}}{A^{0,5} \cdot K_{CV}^{0,75} \cdot H^{0,5}} P^{1,25} \cdot l, \quad (4.4)$$

где d_i - диаметр индентора,

P - приложенная нагрузка,

l - смещение износа индентора,

A – кажущаяся площадь контакта индентора с поверхностью,

K_{CV} – ударная вязкость,

H – твердость.

Скорость абразивного износа обратно пропорциональна твердости гранулы. Ударное разрушение гранулы можно установить согласно приведенному значению:

$$V_{CV} = \frac{\rho_P \cdot U^2 \cdot d_G \cdot H}{K_{CV}^2} \quad (4.5)$$

Во время уплотнения отдельных частиц или слоев частиц последние разрушаются при квазистатическом сжатии. Для одинарных частиц степень разрушения будет аналогична разлому в зависимости от ударной вязкости этих гранул.

В общем виде распределение сил при квазистатическом сжатии частиц индентором представлено на рисунке 4.14.

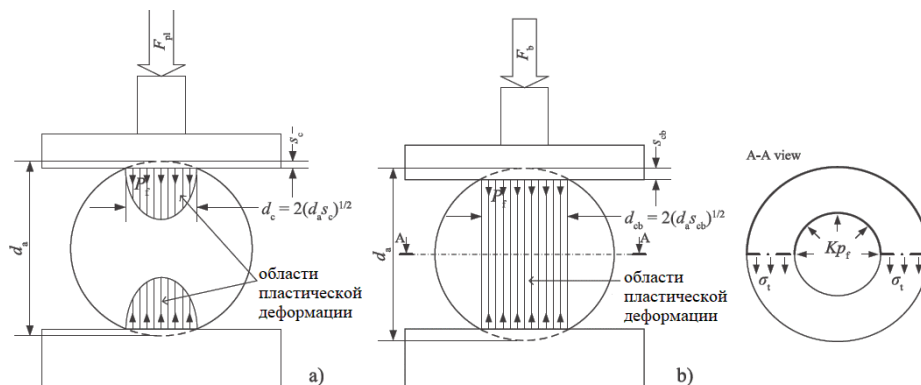


Рисунок 4.14 – Испытание при квазистатическом сжатии и параметры контактной деформации: а) пластическая деформация; б) параметры разрушения

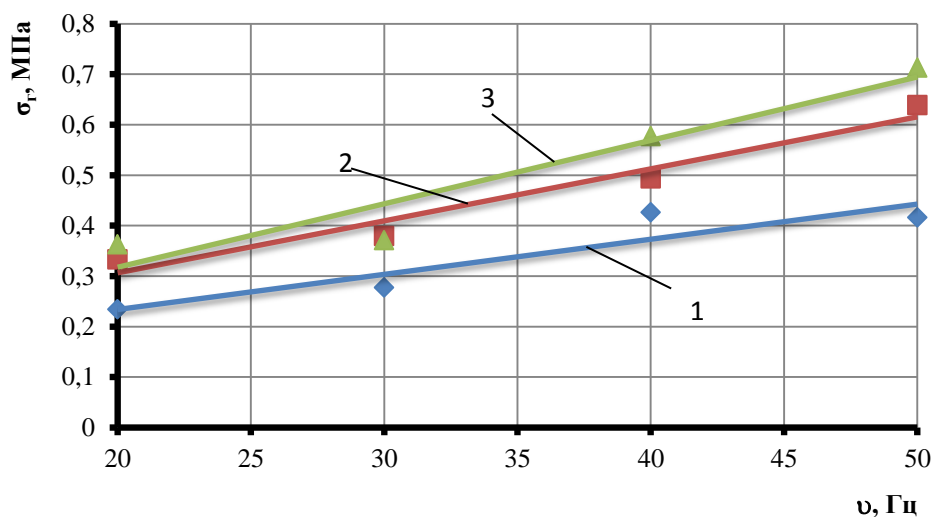


Рисунок 4.15 – Зависимость прочности получаемых гранул при одноосном сжатии от частоты колебаний активатора ($n_T = 32$ об/мин, $n_P = 20$ об/мин, $n_A = 980$ об/мин): 1 – $A_A = 0,5$ мм; 2 – $A_A = 1,7$ мм; 3 – $A_A = 2,5$ мм

Амплитуда колебаний, в свою очередь, приводит к росту прочности гранулята при сжатии частиц в вертикальной плоскости, однако эта зависимость имеет уже не прямолинейный характер: так результаты полученных значений прочности при 1,7 мм и 2,5 мм амплитуды колебаний имеют близкие значения, что свидетельствует о том, что дальнейшее увеличение амплитуды нецелесообразно, поскольку не приводит к желаемому результату еще и при увеличении удельных затрат энергии.

На рисунке 4.16 представлена зависимость прочности получаемых гранул при одноосном сжатии от амплитуды колебаний при различных частотах вращения лопастей активатора при следующих значениях ($n_T = 32$ об/мин, $n_P = 20$ об/мин, $\nu = 25$ Гц) для нативного крахмала.

Зависимость прочности получаемых гранул от амплитуды колебаний имеет экспоненциальный характер. При частоте вращения 600 об/мин (кривая 1) максимальное значение прочности 0,4 МПа наблюдается в точке амплитуды 2 мм. Данного показателя может оказаться недостаточно при транспортировании и фасовании готового продукта, что приведет к истиранию и разрушению гранул,

повышению процентного содержания мелкодисперсной фракции в продукте. Изменение прочности при частоте вращения активатора 980 и 1200 об/мин имеют близкие кривые, по которым виден ее рост в среднем на 30 % при увеличении амплитуды колебаний от 0,5 до 2,5 мм. При повышении амплитуды величина изменения прочности гранулята стремится к нулю и не оказывает существенного влияния.

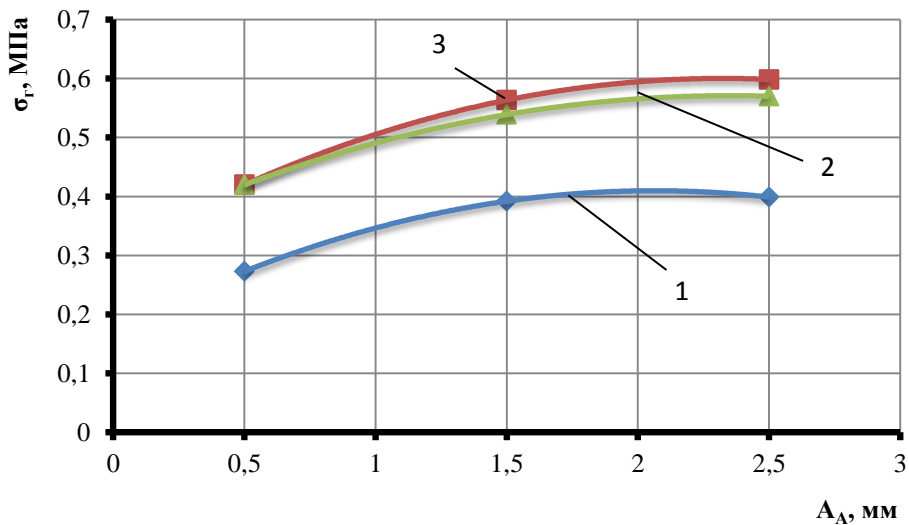


Рисунок 4.16 – Зависимость прочности получаемых гранул при одноосном сжатии от амплитуды колебаний активатора: 1 – $n_A = 600$ об/мин;
2 – $n_A = 980$ об/мин; 3 – $n_A = 1200$ об/мин

Из графика видно, что повышение частоты вращения активатора оказывает существенное влияние на прочность получаемых гранул. Повышение частоты вращения приводит к повышению прочности гранул за счет их деформации в поле наложения сил. Как говорилось ранее, данный показатель также стоит рассматривать в комплексе с остальными выходными параметрами, такими как среднемодальный размер, распадемость и растворимость готового продукта в рабочей жидкости. Данные значения позволяют при заданных значениях гранулометрического состава и среднемодального размера частиц установить предельно допустимые значения прочности получаемых гранул в установке

данного типа, снабженной активатором. Повышение частоты вращения от 980 до 1200 об/мин не дает существенного повышения прочности, но при этом повышает удельные энергозатраты. Таким образом, рассчитанное в Главе 3 рациональное значение частоты вращения активатора 980 об/мин отвечает требованиям прочности при средних энергозатратах.

На рисунках 4.15 и 4.16 представлены графические зависимости, полученные при исследовании СК 90 % КК и 10 % МРК.

На рисунке 4.17 представлена также зависимость прочности получаемых гранул при одноосном сжатии от амплитуды колебаний активатора, только для частоты вращения активатора равного 980 об/мин при использовании в составе продукта 100% КК и СК 90 % КК и 10 % МРК.

На графике видим незначительную разность в значениях прочности при использовании в рецептуре напитка СК (кривая 2) и 100 % нативного КК (кривая 1). Тем не менее СК 90 % КК и 10 % МРК позволяет получить гранулы с большей прочностью при значении амплитуды 1,7 мм на 0,06 МПа, нежели при использовании нативного КК.

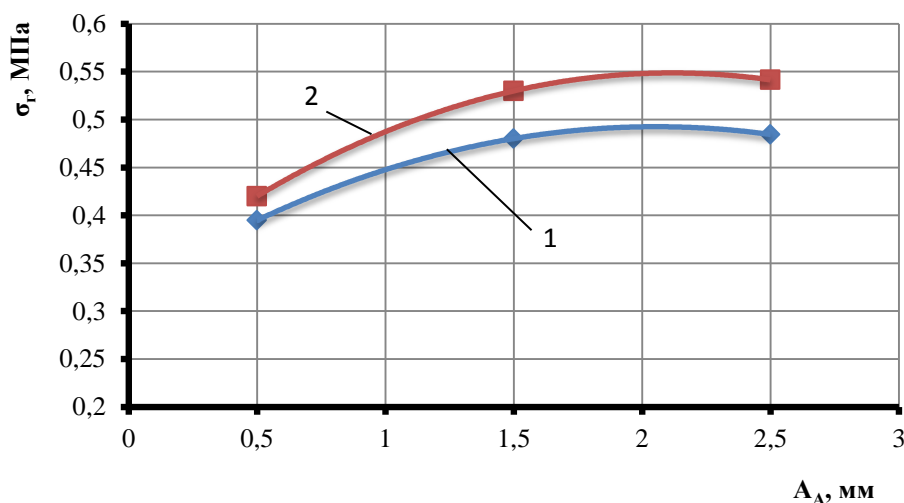


Рисунок 4.17 – Зависимость прочности получаемых гранул при одноосном сжатии от амплитуды колебаний активатора ($n_T = 32$ об/мин, $n_P = 20$ об/мин, $n_A = 980$ об/мин, $\nu = 25$ Гц): 1 – нативный КК; 2 – СК 90 % КК и 10 % МРК

Незначительно большие значения прочности связаны с более развитой поверхностью контакта фаз и плотностью укладки частиц в грануле. Прочность структуры в конечном итоге сводится к определению прочности связей в начальный период жидкостных мостиков, а в последствии после окончания процесса высушивания твердых мостиков, и затем их количества. Соответственно, чем большее количество контактов у частиц имеется, тем более прочная структура гранулы будет получаться. Частицы МРК существенно меньше, чем у картофельного, поэтому они занимают пустоты между частицами большего размера, увеличивая число контактов частиц между собой и дисперсионной средой.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что на структурную прочность получаемого гранулята существенное влияние оказывают варьируемые параметры разработанного активатора. Структурообразование гранул за счет окатывания в данной конкретной установке позволяет получать продукт именно правильной сферической формы в отличие от вибрационных грануляторов или установок с высокими сдвиговыми усилиями. Однако сравнительный анализ прочности и пористости гранулята, получаемого в установках данного типа, и полученного в разработанной установке, позволяет заключить, что пористость гранул в тарельчатом грануляторе с активатором значительно выше при сравнительно небольшой разности в прочности, что связано с более сниженными значениями сдвиговых нагрузок и применением комбинированного способа формирования частиц.

На рисунке 4.18 представлены фотографии полученных гранул в разработанном тарельчатом грануляторе с активатором и миксер-грануляторе.

Применение комбинированного способа с более щадящими режимами в конечном итоге позволяет получить гранулят с более развитой капиллярной системой, сравнительно небольшим снижением статической прочности и более правильной сферической формы, что повышает качество и органолептические показатели готовой продукции.



а)

б)

в)

Рисунок 4.18 – Фотографии гранул, полученных в: а) разработанном тарельчатом грануляторе с активатором; б) миксер -грануляторе; в) микрофотография структуры гранулы, полученной в тарельчатом грануляторе с активатором

4.4 Технологическая система получения инстант-напитков

Производство инстантированного гранулированного киселя осуществляется согласно технологической схеме, представленной на рисунке 4.19.

Сырьем является сахарный песок, рисовый и картофельный крахмал, плодово-ягодное сырье.

Сахарный песок просеивается и измельчается до размеров частиц не более 50 мкм. Рисовый крахмал подвергается тепловой модификации, при которой его нагревают до температуры 50 °С с целью снижения температуры клейстеризации и получения более вязкого раствора. Плодово-ягодное сырье подвергается мойке, просушке и отжиму сока с последующей его концентрацией до 35-40 % масс.

Далее сыпучие компоненты смешиваются в смесителях периодического действия, где происходит ввод жидкого связующего (концентрированного плодово-ягодного сока), и поступают на грануляцию и формирование гранул. После чего гранулы подвергаются сушке. Полученные гранулы классифицируются, отделяя гранулы с размерами, не входящими в диапазон 2,5–3,5 мм. Качественный продукт

повергается упаковыванию. Структурная схема технологической линии производства инстант-напитков приведена на рисунке 4.20.

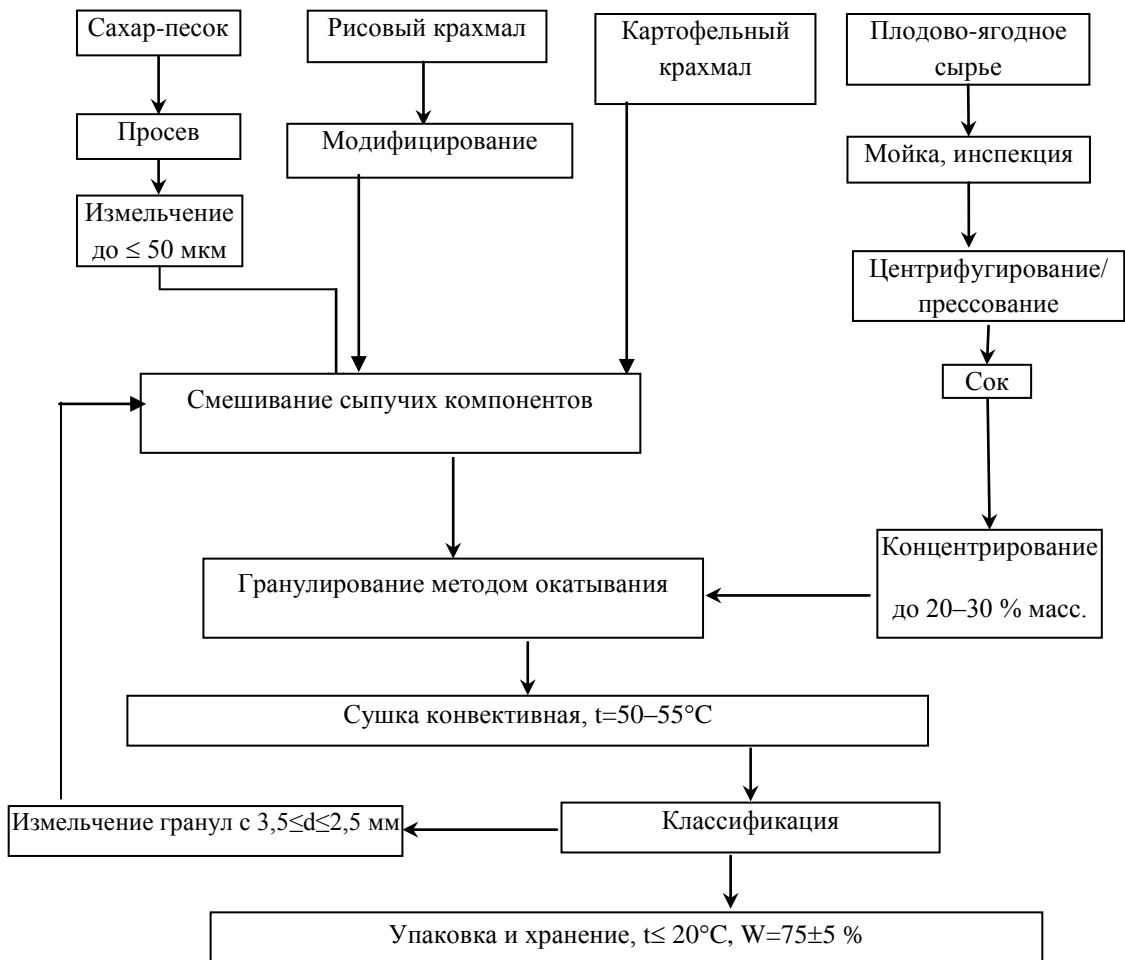


Рисунок 4.19 – Принципиальная технологическая схема производства инстантированного гранулированного киселя

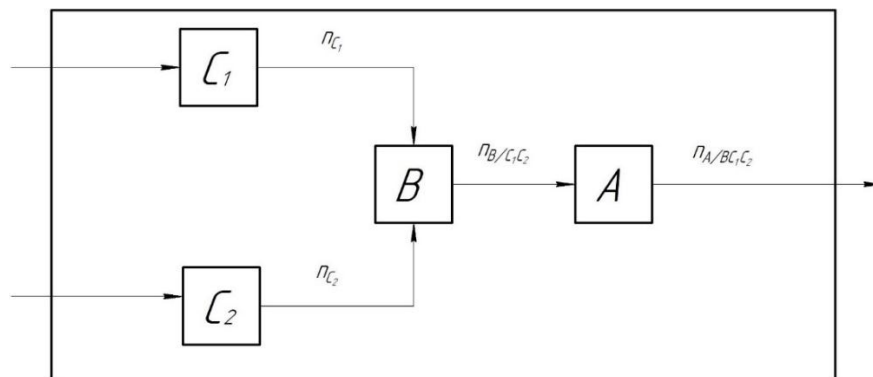


Рисунок 4.20 – Структурная схема производства инстант-напитка

A1 – подсистема получения упакованного продукта с заданными показателями качества (упакованный инстант-напиток).

B – подсистема получения основного полуфабриката (гранулят).

C1 – подсистема обработки исходного сырья (плодово-ягодное сырье).

C2 – подсистема подготовки сырья (обработка крахмала и сахарной пудры).

Согласно анализу данной линии, была выявлена подсистема, вносящая наибольшее возмущающее воздействие на уровень стабильности, это подсистема B – получения полуфабриката в виде влажного гранулята. Показатели гранулята, такие как среднемодалный размер частиц и значение их прочности, выпадали из области допустимых значений. Проведенная модернизация технологии получения инстант-напитков в структурированном виде, а именно узла грануляции позволила получить продукт не только с повышенными показателями качества, но и сократить одну единицу оборудования – смеситель периодического действия, за счет постадийного внесения компонентов в тарель гранулятора (патент РФ № 2608729). На рисунке 4.21 представлена операторная модель разработанной технологии получения инстантированного гранулированного киселя. По приведенной операторной модели можно сказать, что поток относится к сходящемуся виду. В операторной модели представлены следующие подсистемы и операторы:

A – подсистема получения готовой продукции с заданными показателями качества:

I – упаковка готовой продукции в короба;

II – упаковка в индивидуальные пакеты;

III – классификация;

IV – сушка гранулята;

B – подсистема получения полуфабриката (гранулят):

I – структурообразование;

II – смешивание.

C₁ – подсистема обработки исходного сырья (плодово-ягодное):

I – промежуточное хранение сухого компонента;

II – измельчение жома;

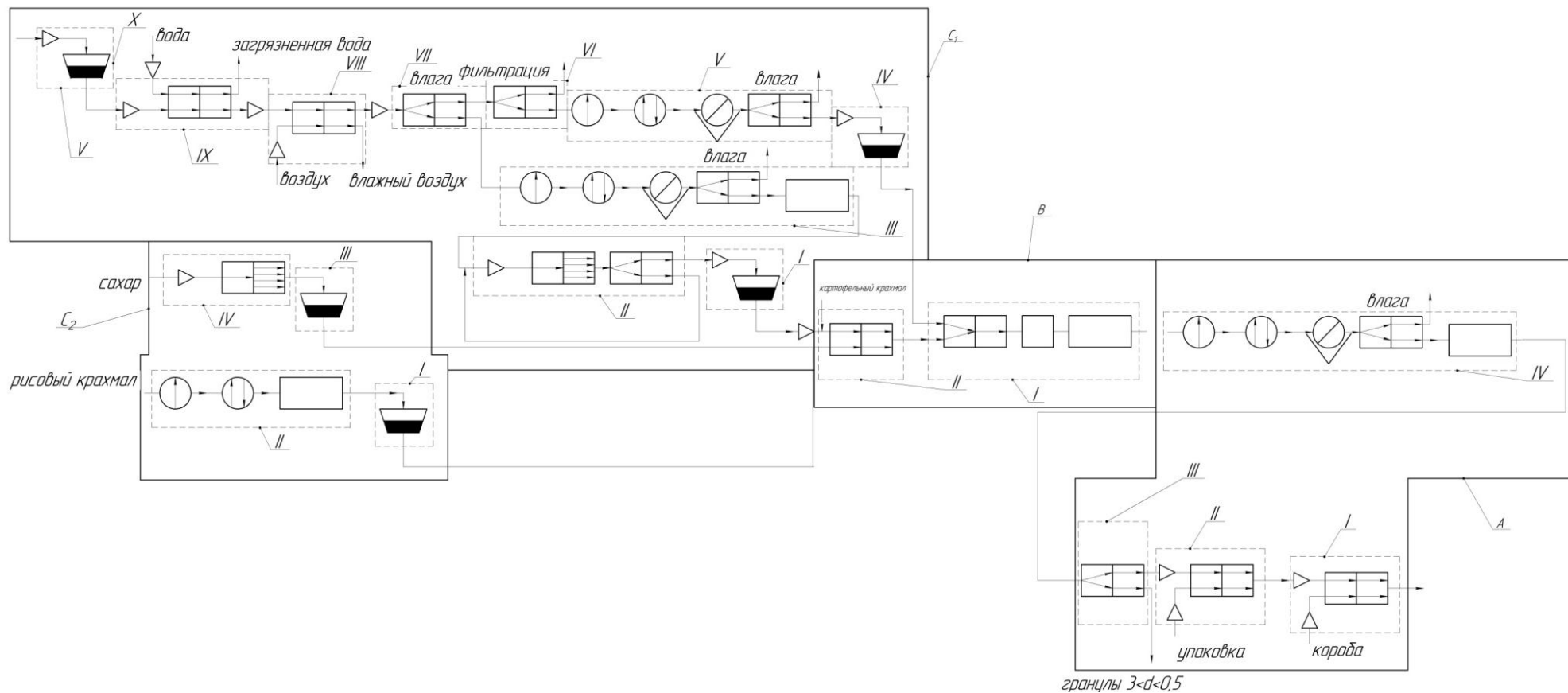


Рисунок 4.21 – Операторная модель линии производства инстантированного гранулированного киселя с применением рисового крахмала, подвергшегося температурной модификации

III – сушка жома;

IV – промежуточное хранение концентрированного сока;

V – концентрирование;

VI – фильтрация;

VII – отжим;

VIII – обдув;

IX – мойка;

X – хранение.

C_2 – подготовка сахарной пудры и рисового крахмала:

I – промежуточное хранение;

II – измельчение сахара-песка;

III – промежуточное хранение;

IV – тепловая модификация рисового крахмала.

Параметры разработанной системы сведены в таблицу 4.1.

Уровень целостности технологической системы производства инстант-напитков на основе плодово-ягодного сырья, состоящей из четырех подсистем А В C_1 C_2 , может быть определен по следующему выражению:

$$\theta_{C_2 C_1 B A} = \eta_{C_2} + \eta_{C_1} + \eta_{B/C_1 C_2} + \eta_{A/B C_1 C_2} - 3, \quad (4.6)$$

где: η_{C_1}, η_{C_2} – стабильность функционирования подсистемы C_1 и C_2 соответственно,

$\eta_{B/C_1 C_2}$ – условная стабильность подсистемы В относительно подсистем C_1, C_2 ,

$\eta_{A/B C_1 C_2}$ – условная стабильность подсистемы А относительно подсистем В, C_1, C_2 .

Подставляя полученные значения из таблицы 4.1 в уравнение 4.9, получили следующее значение целостности системы линии производства инстант-напитков после внедрения нового аппаратного оформления подсистемы В структурообразования:

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

Таблица 4.1 – Стабильность подсистем технологического потока производства инстант-напитков при внедрении нового аппаратурного оформления подсистемы структурообразования

Подсистема	Объем выборки	Число проб, удовлетворяющих полю допуска, шт	Число проб, не удовлетворяющих полю допуска, шт	P_i	$1-P_i$	$-P_i \log_2 P_i$	$-(1-P_i) \cdot \log_2(1-P_i)$	H_i , бит	η_i
A	100	100	0	–	–	–	–	–	1
B	100	100	0	–	–	–	–	–	1
C ₁	100	98	2	0,98	0,02	0,028	0,113	0,141	0,859
C ₂	100	99	1	0,99	0,01	0,014	0,066	0,08	0,92

Сравнительный анализ результатов исследования целостности технологической линии до и после внедрения нового аппаратурного оформления позволяет сделать вывод, что подсистема В, отвечающая за получение полуфабриката с заданными показателями качества в виде влажного гранулята, существенно возросла. Согласно труду [78] установлено, что увеличение количества подсистем приводит к повышению риска выхода системы из области стабильной работы, поскольку каждое последующее отклонение приводит к выходу из состояния равновесия последующих звеньев технологической линии.

Малотоннажное производство зачастую отличается именно малым количеством подсистем, что делает их более устойчивыми.

Стабильность системы после внедрения новых технологических подходов составляет 0,779.

В графическом виде совершенствование технологии получения многокомпонентных инстант-напитков в гранулированном виде можно представить в виде диаграммы (рисунок 4.22).

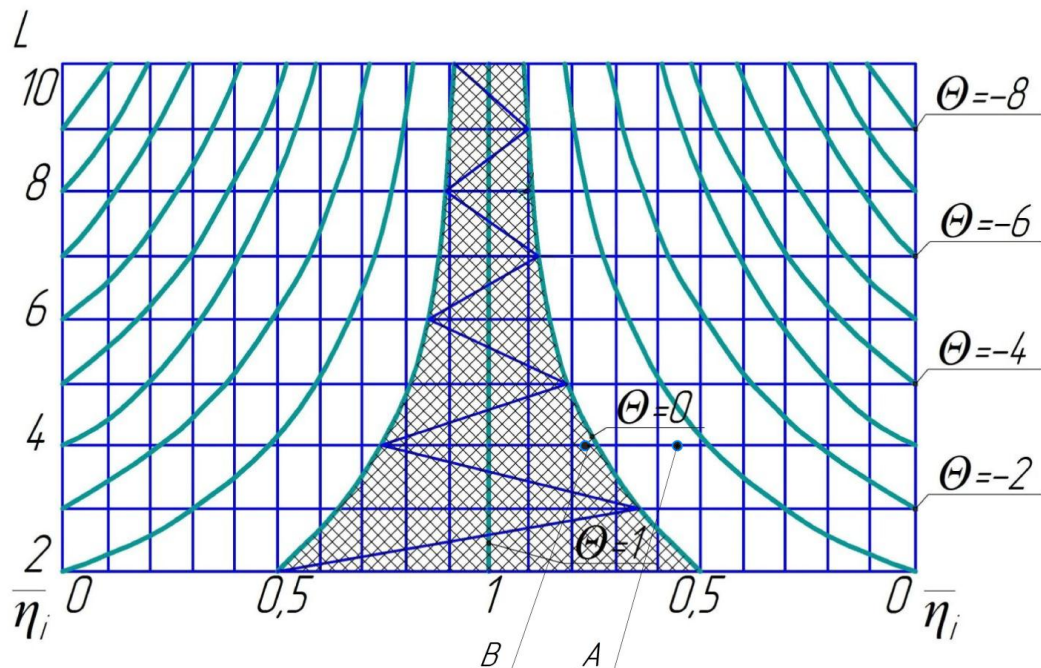


Рисунок 4.22 – Диаграмма процесса развития технологической системы производства инстант-напитков на основе плодово-ягодного сырья:

А – изначальная целостность системы; В – целостность системы после внедрения нового аппаратного оформления

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 высокоразвитых.

4.5 Промышленная реализация и оценка энергетических затрат

В рамках предприятия ООО НПО «Здоровое питание» осуществляют производство гранулированных киселей и других напитков, используя свежее плодово-ягодное сырье, замороженное, а также готовые концентраты соков (экстрактов). В данной работе разработана технологическая схема (рисунок 4.23), представляющая собой набор типовых технологических процессов, увязанных между собой в пространстве и во времени с помощью системы машин.

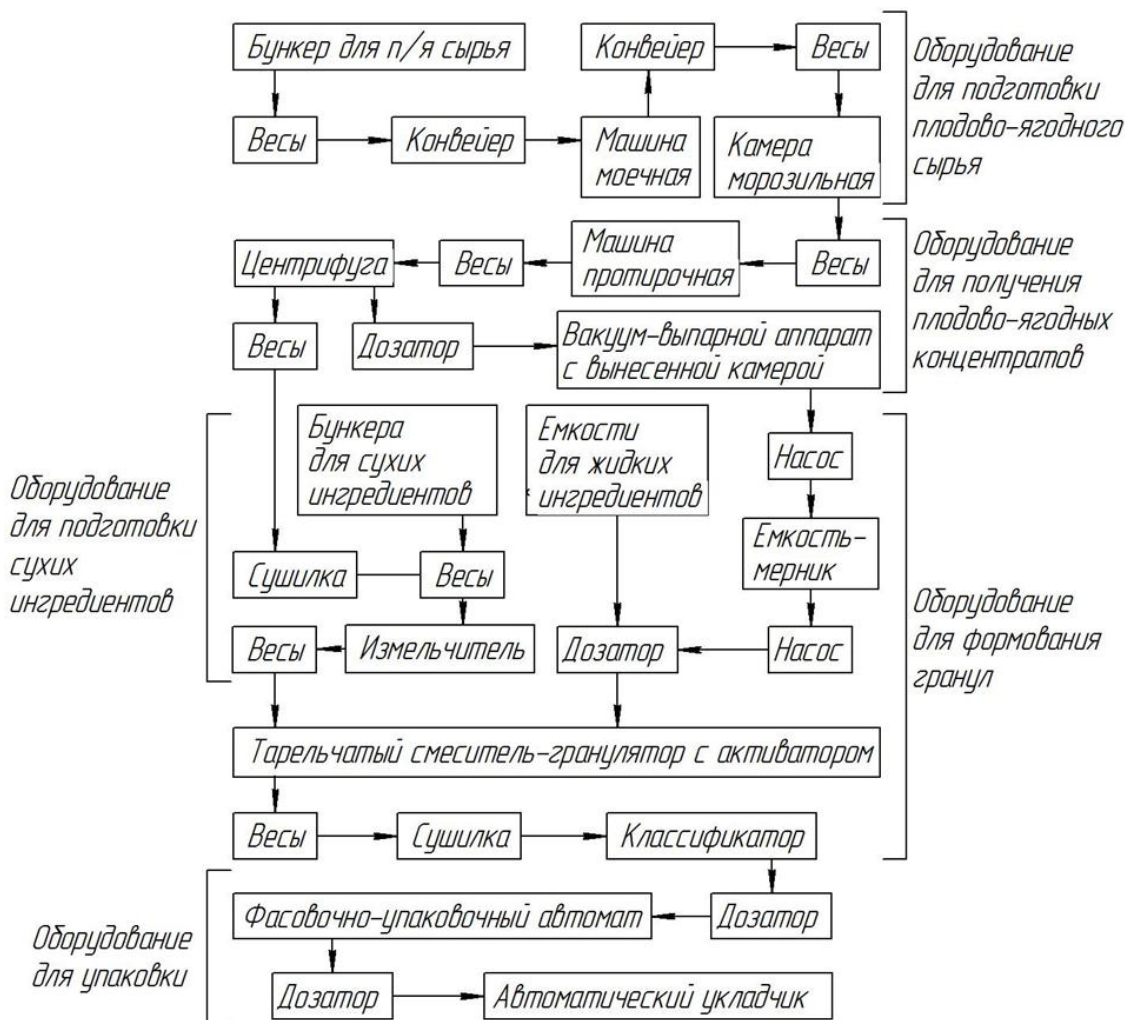


Рисунок 4.23 – Структурная схема технической системы процесса производства инстант-напитка на основе свежемороженого плодово-ягодного сырья

Осуществление производства инстант-напитков согласно запатентованному способу (патент РФ № 2608729) с применением новой конструкции смесителя-гранулятора с активатором позволяет получать пористые агломераты-гранулы, структура которых состоит из микроагломератов зерен крахмала и кристаллов сахарной пудры (лактозы или глюкозы), соединенных между собой первоначально прослойками вязкой, жидкой фазы, а после сушки солевыми мостиками, благодаря чему достигается быстрая диспергируемость гранул. На основе предложенного способа возможно расширение ассортимента быстрорастворимых пищевых продуктов высокого качества и пищевой ценности.

Опытно-промышленная партия продукции на базе разработанного технологического потока произведена на предприятии ООО НПО «Здоровое питание» (г. Кемерово) в объеме 100 кг готового гранулята, получен акт внедрения исследования диссертационной работы (Приложение А).

Эксплуатация технологической линии показала:

1. Продуманность как отдельных технологических решений, так и всей технологической цепочки в целом;
2. Простоту обслуживания в сочетании с высоким качеством производимого продукта;
3. Возможность оперативно подстраивать параметры процесса по ходу работы;
4. Возможность быстрого обучения ОПП, даже с низкой начальной квалификацией, по обслуживанию технологической цепочки;
5. Снижение энергетических затрат.

Снижение энергетических затрат от внедрения разработанной технологической линии достигнуто благодаря совмещению операции смешивания и гранулирования в одном аппарате, получена экономия электроэнергии ввиду устранения одной единицы оборудования (аппарата для центробежного смешивания) и сокращения длительности технологической операции формования гранул, которая включала до модернизации предварительное смешивание сухих и вязких компонентов в течение 25 мин и последующее гранулирование в

тарельчатом грануляторе в течение 5 мин. После модернизации конструкции и подбора ее рациональных параметров для ведения процесса продолжительность технологической операции формования гранул составила 15 мин. Это, в свою очередь, сказывается на себестоимости конечной продукции.

Достигнутая производительность смесителя-гранулятора составила 200 кг/ч против изначальной производительности 180 кг/ч.

Благодаря оснащению гранулятора виброактиватором и подбору рациональных параметров работы аппарата при соблюдении условия минимальных затрат мощности (см. Главу 3) в разработанном грануляторе удельные энергозатраты составляют порядка 1,35 кВт·ч/т. Реализация разработанного технологического потока позволяет снизить суммарные энергозатраты, шедшие на предварительное смешивание в центробежном смесителе и последующее гранулирование, с 1,55 кВт·ч/т продукции до 1,35 кВт·ч/т. Поэтому удельные энергозатраты с установкой новой конструкции снижены на 12,9 % по сравнению с прототипом.

Внедрение данной технологии позволит предприятию ООО НПО «Здоровое питание»:

- 1) расширить ассортимент производимой продукции;
- 2) производить высококачественный, востребованный на рынке продукт с хорошим экономическим эффектом.

4.6 Результаты и выводы по главе

1. Анализ результатов исследований реологических свойств гранулированного напитка с использованием различных СК в приготовленном виде позволил выявить СК с наиболее оптимальным соотношением КК и МРК с точки зрения вязкости и органолептических свойств напитка, таковой явилась СК 90 % КК и 10 % МРК (образец № 3).

2. В результате исследований распадаемости готового продукта выявлено время растворения гранул исследуемой смеси – 5,6 мин, которое соответствует ведению процесса при подобранных в Главе 3 рациональных параметрах работы аппарата, также выявлена обратно пропорциональная зависимость скорости растворения от пористости гранул.

3. Анализ зависимостей прочности получаемых гранул на раздавливание и истирание при варьировании частоты и амплитуды колебаний и частоты вращения активатора в процессе гранулирования с нативным КК и СК 90 % КК и 10 % МРК показал, что применение МРК позволяет повысить прочность получаемых гранул за счет более плотной укладки частиц в грануле в среднем на 25 %. Определено оптимальное значение прочности 0,5–0,6 МПа при пористости 15–16 % для выбранной СК при ведении процесса гранулирования в рамках подобранных рациональных параметров.

4. Определены величины стабильности каждой из подсистем разработанного технологического потока, целостность системы составила 0,779, что на 0,249 выше по сравнению с исходной.

5. Внедрение в производство новой конструкции гранулятора позволило повысить производительность участка формования гранул на 20 кг/ч, а также снизило удельные энергозатраты на 12,9 % по сравнению с прототипом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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 среднемодалым значением $3\pm 0,5$ мм, снизить количество фракции размером менее 0,5 мм до 4,5 %.

3. Определена зависимость среднемодалого 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; $\nu = 25$ 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 дали возможность определить уровень его стабильности и целостности, который повысился с 0,53 до 0,779, что позволило 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамсон, А. А. Физическая химия поверхностей / А. А. Алексеев, Д. Х. Имаев, Н. Н. Кузмин, В. Б. Яковлев. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999. – 435 с.
2. Андрейчиков, А. В. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике. Модели многокритериального анализа деятельности инновационных организаций / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчиков. – Москва: Книжный дом «Либроком», 2013. – 304 с.
3. Андреев, Н. Р. Основы производства нативных крахмалов / Н. Р. Андреев. – Москва: Пищепромиздат, 2001. – 289 с.
4. Арсентьев, В. А. Методы динамики частиц и дискретных элементов как инструмент исследования и оптимизации процессов переработки природных и техногенных материалов / В. А. Арсентьев, И. И. Блехман, Л. И. Блехман [и др.]. // Обогащение руд. – 2010. – № 1. – С. 30–35.
5. Балагуров, И. А. Моделирование кинетики смешивания разнородных сыпучих материалов / И. А. Балагуров, В. Е. Мизонов, Н. Berthiaux, С. Gatumel // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 6. – С. 67–70.
6. Баранцева, Е. А. Об оптимальной подаче сегрегирующего ключевого компонента в смеситель периодического действия / Е. А. Баранцева // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2009. – Т. 52. – Вып. 8. – С. 122–123.
7. Баранцева, Е. А. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет / Е. А. Баранцева, В. Е. Мизонов, Ю. В. Хохлова. – Иваново: ИГЭУ им. Ленина, 2008. – 116 с.
8. Бикмухаметова, Г. К. Современные методы физико-химического анализа / Г. К. Бикмухаметова Г. К. Бикмухаметова, Д. А. Ибрагимова [и др.]. // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – №3. – С. 25–31.

9. Блехман, И. И. Вибрационная механика / И. И. Блехман. – Москва: Физматлит, 1994. – 400 с.
10. Борозденко, Д. А. Диагностика распределения давления внутри зернистого слоя: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 01.04.01 / Борозденко Дмитрий Анатольевич; Алтайский государственный университет. – Барнаул, 2004. – 19 с.
11. Бркич, Г. Э. Технология влажного гранулирования в промышленной фармации / Медико-фармацевтический журнал Пульс. – 2022. – Т. 24. – № 5. – С. 24–28.
12. Ветрова, Н. Т. Разработка технологии и совершенствование процессов производства быстрорастворимого гранулированного завтрака на основе молочной сыворотки и экстракта аронии черноплодной: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.18.04 / Ветрова Надежда Толибджоновна. – Кемерово, 2007. – 113 с.
13. Вилесов, Н. Г. Процессы гранулирования в промышленности / Н. Г. Вилесов, В. Я. Скрипко, В. Л. Ломазов, И. М. Таиченко. Техника. – 1976. – 192 с.
14. Витюгин, В. М. К теории окомкования влажных дисперсных материалов / В. М. Витюгин. – Известия ТПИ. – 1975. – Т. 272. – С. 127.
15. Гамаюнов, В. И. Исследование фазового состава переносимой влаги в процессе сушки пористых материалов / В. И. Гамаюнов // Промышленная теплотехника – 1996. – № 5. – С. 88–94.
16. Гамбаров, Г. М. Статистическое моделирование и прогнозирование / Г. М. Гамбаров, Н. М. Журавель, Ю. Г. Королев [и др.]. – Москва: Финансы и статистика, 2000. – 340 с.
17. Герасименко, Е. О. Сухая смесь для приготовления напитка с лечебнопрофилактическими свойствами / Е. О. Герасименко, Е. А. Бутина, Е. П. Корнева // Хранение и переработка сельхозсырья. – 1998. – № 3. – С. 7.
18. Гиргидов, А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) / А. Д. Гиргидов. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГПУ, 2002. – 544 с.

19. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман – Москва: Высшая школа, 2003. – 479 с.
20. Гольдштик, М. А. Процессы переноса в зернистом слое / М. А. Гольдштик. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2005. – 358 с.
21. Горбатов, А. В. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов / А. В. Горбатов, Ю. А. Мачихин, А. М. Маслов [и др.]. – Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 296 с.
22. Горбунова, А. М. Экспериментальное исследование внешнего массообмена в слое дисперсного материала, подверженного вибрационному воздействию / А. М. Горбунова, Б. Г. Сапожников // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56. – № 4. – С. 116–118.
23. Грачев, Ю. П. Математические методы планирования экспериментов / Ю. П. Грачев. – Москва: Пищевая промышленность, 1979. – 200 с.
24. Дерягин, Б. В. Вода в дисперсных системах / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, Ф. Д. Овчаренко. – Москва: Химия, 1989. – 288 с.
25. Дерягин, Б. В. Адгезия твердых тел / Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, С. П. Смилга – Москва : Наука, 1973. – 279 с.
26. Дилигенский, Н. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация / Н. В. Дилигенский, Л. Г. Дымова, Н. В. Севастьянов. – Москва: Машиностроение, 2004. – 397 с.
27. Догаева, Л. А. Классификация и идентификационные признаки функциональных безалкогольных напитков / Л. А. Догаева, Н. Т. Пехтерева // Пиво и напитки. – 2011. – № 5. – С. 62–64.
28. Долгунин, В. Н. Моделирование сегрегации в сдвиговом потоке зернистого материала / В. Н. Долгунин // Проблемы и решения, Вестник ТГТУ. – 1998. – № 4. – С. 98–107.
29. Долгунин, В. Н. Сегрегация при сдвиговой деформации зернистого материала / В. Н. Долгунин, В. Я. Борщев, Р. А. Шубин // Химическое и нефтегазовое машиностроение – 2008. – № 1. – С.7–10.

30. Доня, Д. В. Реология вязкопластичных сред в одношнековых экструдерах / Д. В. Доня, К. Б. Плотников. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2018. – 165 с.: ил., схем., табл.

31. Драпкина, Г.С. Разработка технологии сухой гранулированной сыворотки методом окатывания: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.18.04 / Драпкина Галина Станиславовна. – Кемерово, 2001. – 167 с.

32. Дуброва, Т. А. Статистические методы прогнозирования / Т. А. Дуброва. – Москва: ЮНИТИ – ДАНА, 2003. – 133 с.

33. Драчева, Л. В. Аналитические методы измерений и приборы / Л. В. Драчева // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2009. – № 1. – С. 41.

34. Жушман, А. И. Модифицированные крахмалы / А. И. Жушман. – Москва: Пищепромиздат, 2007. – 234 с.

35. Кавецкий, Г. Д. Процессы и аппараты пищевой технологии / Г. Д. Кавецкий, Б. Д. Васильев. – Москва: Колос, 1999. – 551 с.

36. Капранова, А. Б. Исследование ударного смешивания твердых дисперсных сред при вторичных столкновениях частиц / А. Б. Капранова, М. Н. Бакин, А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технологи, 2013. – Т. 56. – № 6. – С. 83–86.

37. Касьянов, Г. И. Биотехнология получения и применения экстрактов и структурообразователей / Г. И. Касьянов, М. Ю. Тамова. – Краснодар: Экоинест, 2002. – 229 с.

38. Киселев, Д. В. Задачи многокритериального выбора при синтезе технологических систем / Д. В. Киселев, Т. Джо, М. Н. Пуцин [и др.]. – Наукоедение: интернет-журнал. – 2014. – Вып. 4 (23). – URL: <http://naukovedenie.ru>. (дата обращения 13.10.2022).

39. Киселёва, Т. Ф. Формирование технологических и социально значимых потребительских свойств напитков: теоретические и практические аспекты / Т. Ф. Киселёва. – Кемерово: КемТИПП, 2006. – 271 с.

40. Киселева, Т. Ф. Концептуальный подход к разработке функциональных напитков с социально значимыми свойствами / Т. Ф. Киселева // Пиво и напитки. – 2006. – № 3. – С.4 – 5.
41. Классен, П. В. Гранулирование / П. В. Классен, И. Г. Гришаев, И. П. Шомин. – Москва: Химия, 1991. – 240 с.
42. Классен, П. В. Основные процессы технологии минеральных удобрений / П. В. Классен, И. Г. Гришаев. – Москва: Химия. 1990. – 304 с.
43. Классен, П. В. Основы техники гранулирования / П. В. Классен, И. Г. Гришаев. – Москва: Химия, 1982. – 272 с.
44. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика / А.И. Кобзарь. – Москва: Физматлит, 2006. – 816 с.
45. 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.
46. Коняев, А. В. Исследование прочности получаемых гранул инстантированных напитков / А. В. Коняев, К. Б. Плотников, Д. В. Доня, И. О. Плотникова // 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. 105–106.
47. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников /А. И. Кобзарь. – Москва: Физматлит, 2006. – 816 с.
48. Козьмина, Н. П. Теоретические основы прогрессивных технологий. Зерноведение / Н. П. Козьмина, В. А. Гунькин, Г. М. Сусянок. – Москва: Колос, 2006. – 464 с.
49. Кочегаров, И. И. Методы контроля дисперсности порошков / И. И Кочегаров, В. А. Трусов, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: ПГУ, 2010. – Т. 2. – С. 12–16.

50. Кравченко, С. Н. Технология переработки растительного сырья / С. Н. Кравченко, Г. С. Драпкина, М. А. Постолова // *Фундаментальные исследования*. 2007. – № 8. – С. 36.

51. 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.

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

53. Краснов, А. Е. Оптимальное управление составом многокомпонентных растворов для получения изделий с заданными свойствами / А. Е. Краснов, С. В. Николаева, С. А. Красников // *Производство спирта и ликеро-водочных изделий*. – 2008. – № 3. – С. 16–20.

54. Кругляков, В. Ю. Управление свойствами сферических гранул на основе оксида алюминия, получаемых дисковым (тарельчатым) формованием / В. Ю. Кругляков, А. В. Глазырин, Л. А. Исупова // *Катализ в промышленности*. – 2019. – Т. 19 – №2. – С. 132–141.

55. Кулаичев, А. П. Методы и средства комплексного анализа данных / А. П. Кулаичев. – Москва: ФОРУМ ИНФА, 2006. – 512 с.

56. Лебедев, А. Е. Математическая модель механики движения сыпучих материалов в разреженных потоках аппаратов с эластичными рабочими элементами / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, А. Б. Капранова, И. О. Кузьмин // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. – 2012. – Т.52. – № 5. – С. 111–113.

57. Литвяк, В. В. Крахмал и крахмалопродукты / В. В. Литвяк, Ю. Ф. Росляков, С. М. Бутрим [и др.]. – Краснодар: Кубанский государственный технологический университет, 2013. – 204 с.

58. Лобовиков, Д. В. Влияние изменения параметров на процесс окатывания. / Д. В. Лобовиков // *Вестник ПГТУ. Механика и технология*

материалов и конструкций / Пермский государственный технический университет. – Пермь, 2002. – С. 263–272.

59. Ловкис, З. В. Технология крахмала и крахмалопродуктов / З. В. Ловкис, В. В. Литвяк, Н. Н. Петюшев. – Минск: Асобны, 2007. – 178 с.

60. Лотов, В. А. Закономерности оптимального формирования структур в технологии материалов на основе силикатных дисперсных систем: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.17.11 / Лотов Василий Агафонович. – Томск, 2002. – 38 с.

61. Лотов, В. А. Основы управления процессами структурообразования во влажных дисперсных системах / В. А. Лотов, В. В. Гурин, А. М. Попов. – Кемерово; Москва: Издательское объединение «Российские университеты»: Кузбассвуиздат – АСТШ, 2006. – 295 с.

62. Макаренков, Д. А. Исследование процессов смешения и гранулирования методом компактирования сырьевых шихт для производства грунтовых и покровных эмалей / Д. А. Макаренков, В. И. Назаров // Научные технологии. – 2013. – Т.14. – №3. – С. 30–35.

63. Майтаков, А. Л. Получение гранулированных быстрорастворимых киселей на основе молочной сыворотки и растительного сырья / А. Л. Майтаков, Л. Н. Берязева, Н. Т. Ветрова, К. Б. Плотников // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология; Кубанский государственный технологический университет. – 2020. – № 2–3. – С. 38–42.

64. Максимов, В. И. Медицинский аспект пищевого крахмала / В. И. Максимов, В. Е. Родоман // Вопросы питания. – 1999. – № 1. – С. 46–48.

65. Маюрникова, Л.А. Разработка рациональной технологии порошкообразных смесей для напитков на основе местного растительного сырья: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.18.04 / Маюрникова Людмила Александровна. – Москва, 1993. – 24 с.

66. Мельникова, Е. И. Безалкогольные напитки с компонентами нетрадиционного сырья / Е. И. Мельникова, К. К. Полянский // Пиво и напитки. – 2003. – № 3. – С. 30–32.

67. Мизонов, В. Е. Математическая модель формирования многокомпонентной смеси сегрегирующих компонентов / В. Е. Мизонов, И. А. Балагуров, А. В. Митрофанов // Известия высших учебных заведений: Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57. – Вып. 8. – С. 67–70.

68. Мизонов, В. Е. Влияние многослойной загрузки разнородных зернистых материалов в смеситель периодического действия на кинетику и производительность смешивания / В. Е. Мизонов, И. А. Балагуров, Н. Berthiaux, С. Gatumel // Известия высших учебных заведений: Химия и химическая технология. – 2016. – Т. 59. – Вып. 10. – С. 54–60.

69. 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.

70. Миллер, Е. С. Диагностирование технологических параметров качества подсистемы коагуляционного структурирования гранул / Е. С. Миллер, Д. В. Доня, А. М. Попов [и др.]. // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6 (ч. 6). – С. 1144–1148.

71. Миллер, Е. С. Особенности формирования структур в технологии получения полидисперсных продуктов / Е. С. Миллер, А. М. Попов, А. С. Мамонтов [и др.]. // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2. – С. 1866–1870.

72. Неддерман, Р. Толщина зоны сдвига движущихся гранулированных материалов // Механика гранулированных сред / Р. Неддерман, К. Лаохакуль // Теория быстрых движений : сборник статей / пер. с англ.; сост. И. В. Ширко. – Москва: Мир, 1985. – С. 65–85.

73. Орлов, А. И. Прикладная статистика / А. И. Орлов. – Москва: Экзамен, 2006. – 671 с.

74. Охорзин, В. А. Прикладная математика в системе MATHCAD / В. А. Охорзин. – Санкт-Петербург: Лань, 2008. – 352 с.

75. Павлова, В. В. Современные тенденции в производстве сухих поликомпонентных продуктов / В. В. Павлова, А. Г. Галстян, Ю. А. Бродский,

Д. В. Харитонов // Сборник научных трудов Северо-Кавказского государственного технического университета. – Ставрополь, 2002. – С. 17–20.

76. 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.

77. Панфилов, В. А. Организация пищевых технологий будущего и фундаментальные изыскания настоящего / В. А. Панфилов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – № 12. – С. 6–9.

78. 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.

79. Панфилов, В. А. Технологические линии пищевых производств. Теория технологического потока / В. А. Панфилов. – Москва: Колос, 1993. – 288 с.

80. Панфилов, В. А. Технологические линии пищевых производств: создание технологического потока / В. А. Панфилов, О. А. Ураков. – Москва: Пищевая промышленность, 1996. – 472 с.

81. Панфилов, В. А. Технологические линии пищевых производств; создание технологического потока / В. А. Панфилов, О. А. Ураков. – Москва: Пищевая промышленность, 1996. – 472 с.

82. 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.

83. 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.

84. 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.

85. Плотников, К. Б. Совершенствование технологического потока линии производства инстантированного киселя / К. Б. Плотников, А. М. Попов, И. Б. Плотников [и др.]. // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – Т. 50. – № 1. – С. 96–105.

86. Плотников, К. Б. Исследование процесса агломерирования / К. Б. Плотников, И. Б. Плотников, Д. В. Доня, Р. В. Крюк // Холодильная техника и биотехнологии. Сборник тезисов II национальной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 2020. – С. 137–139.

87. Позняковский, В. М. Пищевая биотехнология продуктов из сырья растительного происхождения / В. М. Позняковский, О. А. Неверова, Г. А. Гореликова. – Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2007. – 416 с.

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

89. Попов, А. М. Научное обоснование и реализация технологических процессов производств сухих концентратов напитков с использованием молочной сыворотки: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.18.04 / Попов Анатолий Михайлович. – Кемерово, 2003. – 359 с.

90. 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.

91. Попов, А. М. Физико-химические основы технологий полидисперсных гранулированных продуктов питания / А. М. Попов. – Новосибирск: Сиб. Унив. изд-во, 2002. – 324 с.

92. Попов, А. М. Методика определения оптимальной формовочной влажности при гранулировании окатыванием растворимых дисперсных смесей / А. М. Попов // «Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования и интенсификации технологических процессов пищевых производств»: сборник научных трудов. Москва: МГУПБ, 2002. – С. 335–339.

93. Попов, А. М. Исследование влагопроводных свойств пищевых дисперсных масс / А. М. Попов, О. В. Балагура // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2003. – № 2. – С. 43–44.

94. 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.

95. Попов, А. М. Изменение фазовых характеристик влажных дисперсных систем / А. М. Попов, Д. В. Доня, С. Н. Кравченко [и др.]. // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11-2. – С. 318–322.

96. Постолова, М. А. Разработка и исследование технологии быстрорастворимого гранулированного черничного киселя на основе молочной сыворотки: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.18.04 / Постолова Мария Анатольевна. – Кемерово, 2003. – 139 с.

97. Рязанова Т.К. Фармакогностическое исследование плодов и побегов черники обыкновенной // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8. – С. 1136–1140.

98. Сарафанова, Л. А. Применение пищевых добавок в индустрии напитков / Л. А. Сарафанова. – Санкт-Петербург: Профессия, 2007. – 240 с.

99. Семенов, С. С. Оценка качества и технического уровня сложных систем: практика применения метода экспертных оценок / С. С. Семенов. – Москва: Ленанд, 2015. – 52 с.

100. Сергеев В. Н., Кокаев Ю.И. Биологически активное растительное сырье в пищевой промышленности / В. Н. Сергеев, Ю. И. Кокаев // Пищевая промышленность. – 2001. – № 6. – С. 28–30.

101. Соболева, О. А. Порошкообразные смеси нового поколения для инстантированных напитков / О. А. Соболева // Пиво и напитки. – 2013. – № 4. – С. 62.

102. Сосюра, Е. А. Разработка технологии напитков функционального назначения на основе виноградного сока: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сосюра Елена Алексеевна– Краснодар, 2014. – 208 с.

103. Спиричев, В. Б. Обогащение пищевых продуктов витаминами и минеральными веществами. Наука и технология / В. Б. Спиричев, Л. Н. Шатнюк, В. М. Позняковский. – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2004. – 548 с.

104. Сухоруков, А. В. Разработка технологии быстрорастворимого гранулированного напитка с использованием творожной сыворотки и растительного сырья: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.18.04 / Сухоруков Андрей Васильевич. – Улан-Удэ, 2009. – 108 с.

105. Таран, А. Л. Оценка условий, обеспечивающих гранулирование порошков окатыванием / А. Л. Таран // Химическая промышленность. – 2000. – № 3. – С. 169–172.

106. Таран, Ю. А. Разработка и анализ процессов гранулирования расплавов с использованием экологически безопасных энергосберегающих схем: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.17.08 / Таран Юлия Александровна; Московская государственная академия тонкой химической технологии им. Ломоносова. – Москва. 2011. – 254 с.: ил.

107. Тихонов, В. В. Разработка и исследование технологии гранулирования творожной сыворотки: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.18.04 / Тихонов Виктор Владимирович. – Кемерово, 2003. – 140 с.

108. Токаев, Э. С. Обзор современного рынка функциональных напитков / Э. С. Токаев, Е. Н. Баженова // Пиво и напитки. – 2007. – № 4. – С. 4–8.

109. Тюкин, А.П. Разработка комбинированного метода обогащения зернистых материалов с применением технологий аэродинамической и ударной сепарации: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 25.00.13 / Тюкин Александр Павлович. – Москва, 2013. – 25 с.

110. Федоренко, И. Я. Теория смешения гетерогенных систем / И. Я. Федоренко, А. Н. Кулинич, И. Ю. Александров // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2000. – № 10. – С. 16–19.

111. Чернецкая, И. Е. Методы, модели и алгоритмы управления технологическим процессом гранулообразования тонкоизмельченных железорудных материалов: специальность 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям): автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Чернецкая Ирина Евгеньевна. – Курск, 2011. – 44 с.

112. Шаршунов, В. А. Технологическое оборудование мясоперерабатывающих предприятий / В. А. Шаршунов, И. М. Кирик – Минск: Мисанта, 2012. – 676 с.

113. Шатнюк, Л. Н. Соки и напитки как источники витаминов в питании человека / Л. Н. Шатнюк, В. Б. Спиричев // Вопросы питания. – 1999. – № 2. – С. 3–5.

114. Шмойлова, Р. А. Теория статистики / Р. А. Шмойлова. – Москва: Финансы и статистика, 2004. – 656 с.

115. Aarons, L. Shear flow of assemblies of cohesive and non-cohesive granular materials / L. Aarons, S. Sundaresan // Powder Technology. – 2006. № 169 – P. 10–21.

116. Aarons, L. Shear flow of assemblies of cohesive granular materials under constant applied normal stress / L. Aarons, S. Sundaresan // Powder Technology. – 2008. – № 183. – P. 340-355.

117. Adams, M. J. Agglomerate Coalescence / M. J. Adams, C. Thornton, G. Lian // First International Particle Technology Forum, August 17–19, Denver USA. – 1994. – Vol. 1. – P. 220–224.

118. Adetayo, A. A. Population balance modelling of drum granulation of materials with wide size distributions / A. A. Adetayo, J. D. Litster, S. E. Pratsinis, B. J. Ennis // *Powder Technol.* – 1995. – № 82. – P. 37–49.

119. Antonyuk, S. Breakage behaviour of spherical granulates by compression / S. Antonyuk, J. Tomas, S. Heinrich, L. Mörl // *Chemical Engineering Science*, 2005. – № 60. – P. 4031–4044. – DOI: 10.1016/j.ces.2005.02.038.

120. Borodulin, D. M. Flour Baking Mixes: Optimal Operating Parameters for Vibration Mixers Food Processing / D. M. Borodulin, D. M. Sukhorukov, E.S. Miller [at al.]. // *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021. – T. 51. – № 1. – C. 196–208. – DOI: 10.21603/2074-9414-2021-1-196-208.

121. Bika, D. G. Mechanical properties of agglomerates / D. G. Bika, M. Gentzler, J. N. Michaels // *Powder Technology*. – 2001. – № 117. – P. 98–112.

122. Cherepanova M. V. Research of pulverized halurgic potassium chloride agglomeration / M. V. Cherepanova, E. O. Kuzina, V. Z. Poylov, D. A. Munin // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. – 2019. – № 330(4). – P. 68–77.

123. De Simone V. Wet-granulation process: phenomenological analysis and process parameters optimization / V. De Simone, D. Caccavo, G. Lamberti [at al.]. // *Powder Technology*. – 2018. – № 340. – P. 411–419.

124. De Simone V. HPMC granules by wet granulation process: Effect of vitamin load on physicochemical, mechanical and release properties / V. De Simone, A. Dalmoro, G. Lamberti [at al.]. // *Carbohydrate Polymers*. – 2018 – № 181. – P. 939–947.

125. Harthong, B. Modeling of high-density compaction of granular materials by the Discrete Element Method / B. Harthong, J. F. Jerier [at al.]. // *Doremus International Journal of Solids and Structures*. – 2009. – № 46. – P. 3357–3364.

126. Hoornaert, F. Powder agglomeration in a lo'dige granulator / F. Hoornaert, G. M. H. Meesters, S. E. Pratsinis, B. Scarlett // *International Forum Particle Technology*, Denver, 1994. – P. 158–165.

127. Hoornaert, F. Agglomeration behaviour of powders in a lođige mixer granulator / F. Hoornaert, P. A. L. Wauters, G. M. H. Meesters, S. E. Pratsinis, B. Scarlett // Powder Technology. – 1998. – № 96. – P. 116–128.

128. Iveson, S. M. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review / S. M. Iveson, J. D. Litster, K. Hapgood, B. J. Ennis // Powder Technology. – 2001. – № 117. – P. 3–39.

129. Iveson, S. M. Fundamental studies of granule consolidation: Part 2: Quantifying the effects of binder surface tension / M. Iveson, J. D. Litster // Powder Technology. – 1998. – № 99. – P. 243–250.

130. Irfan-Khan, M. Stability of wet agglomerates in granular shear flows / M. Irfan-Khan, G. I. Tardos // J. Fluid Mech. – 1997. – № 347. – P. 347–368.

131. Jane, J. Granule morphology by scanning electron microscopy / J. Jane // Anthology of starch. – 1994. – № 46. – P. 121–129.

132. Krainov, Yu. E. Analysis of working chambers which provide thermal treatment and waste granulation of agricultural raw materials / Yu. E. Krainov, O. V. Mikhailova, N. K. Kirillov // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. – 2018. – № 42(2). – P. 6–12. (In Russ.). – URL: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2018-2-6-12> (дата обращения: 12.04.2021).

133. Liu, L. X. Coalescence of deformable granules in wet granulation processes / L. X. Liu, S. M. Iveson, J. D. Litster, B. J. Ennis // AIChE J. – 2000. – № 46. – P. 529–539.

134. Naito, M. Microscopic analysis on the consolidation process of granule beds / M. Naito, K. Nakahira, T. Hotta [at al.]. // Powder Technology. – 1998. – № 98. – P. 214–219.

135. Osokin, A. V. Development of the mathematical model of granulated material movement in flat matrix granulator spinnerets / A. V. Osokin // Proceedings of Irkutsk State Technical University. – 2018. – № 22(4). – P. 43–61.

136. Pierrat, P. Tensile strength of wet granular materials / P. Pierrat, H. S. Caram // Powder Technology. – 1997. – № 91. – P. 83–93.

137. Prescott, J. K. On powder flowability / J. K. Prescott, R. A. Barnum // *Pharmaceutical Technology*. – 2000. – № 24. – P. 60–84.

138. 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 [at al.]. // *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. – 2021. – P. 042004. – DOI:10.1088/1755-1315/640/4/042004.

139. Rumpf, H. The Strength of Granules and Agglomerates / H. Rumpf, W. A. Knepper // *AIME, Agglomeration, Interscience*. – New York, 1962. – P. 379–418.

140. Shentsova, E. S. Determination of technological parameters of the granulation of mixed fodders for young rabbits and the evaluation of their effectiveness / E. S. Shentsova, E. E. Kurchaeva, A. V. Vostroilov, L. A. Esaulova // *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. – 2018. – № 80(3). – P. 176–184.

141. Sevostyanov, M. V. Pneumatic mechanical equipment for microgranulation of manmade materials / M. V. Sevostyanov, T. N. Ilyina, I. P. Boichuk [at al.]. // *Transactions of the Tambov State Technical University*. – 2017. – № 2(3) – P. 452–460.

142. Veronica, N. Influence of spray nozzle aperture during high shear wet granulation on granule properties and its compression attributes / N. Veronica, H. P. Goh, C. Y. X. Kang [at al.]. // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2018. – № 553(1–2). – P. 474–482.

143. Wauters, P. A. L. Batch and continuous drum granulation of copper concentrate: The influence of binder content and binder distribution / P. A. L. Wauters, R. van de Water, J. D. Litster [at al.]. // *Engineering Foundation Conference, Control of Particulate Processes VI, 19–24 September, Fraser Island, Australia, 1999*. – P. 258.

144. Whistler, R. L. Starch: chemistry and technology / R. L. Whistler, J. N. BeMiller – USA: Elsevier Science, 2009. – P. 894.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения конструкции

ООО НПО «Здоровое питание»
650514, Кемеровская обл., Кемеровский р-н,
п. Металлообладка, ул. Спортивная, д.3 «А»
ИНН 4234009729, тел.: 8-904-378-38-93



УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО НПО «Здоровое питание»

А.А. Попов

11 / 2021 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования
Миллер Екатерины Сергеевны для предоставления
в диссертационный Совет Д 24.2.315.05 при
ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»
по адресу: 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6

Результаты диссертационной работы Миллер Е.С. на тему «Совершенствование технологии получения многокомпонентных инстант-напитков в гранулированном виде» внедрены на ООО НПО «Здоровое питание». В рамках исследований были выявлены причины низкой прочности гранул, неоднородности гранулометрического состава производимых напитков, разработаны конструкторские решения, что подтверждается совместным патентом РФ № 2491985.

Практическая значимость: проведенная модернизация узла гранулирования позволила повысить качество гранул напитков, сократить продолжительность технологического цикла, что положительно отразилось на себестоимости продукции.

Главный технолог

Е.Е. Петушкова

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения в учебный процесс



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

650000, Кемерово, ул. Красная, 6
Телефон: 8(3842) 58-12-26. Факс: 8(3842) 58-38-85
E-mail: rector@kemsu.ru, <http://www.kemsu.ru>

№ _____

В Диссертационный Совет Д
24.2.315.05 при ФГБОУ ВО
«Кемеровский государственный
университет»

Настоящим сообщаяю, что материалы диссертационной работы Миллер Екатерины Сергеевны «Совершенствование технологии получения многокомпонентных инстант-напитков в гранулированном виде», связанные с диагностикой технологических систем производства инстантированных напитков, нашли применение в учебном процессе при изложении дисциплины «Теория технологического потока», выполнением курсовых и выпускных квалификационных работ при подготовке студентов направления 15.04.02 – «Технологические машины и оборудование».

Руководитель магистерской программы:

д.т.н., проф., проф. кафедры

«Мехатроники и автоматизации
технологических систем»,

ФГБОУ ВО «Кемеровский

государственный университет»

А.М. Попов



ПРИЛОЖЕНИЕ В**Выборка экспериментальных данных**

п тар.	п акт.	п диск	А акт.	υ акт.	d мод.	Нполез./Нполная
32	980	20	1,7	25	3,8	26
30	600	15	1,5	20	3,5	23
30	600	15	2,5	20	3,2	21
30	600	15	0,5	40	3,4	25
30	600	15	1,5	40	3,1	22
30	600	15	2,5	40	2,9	21
30	1200	15	0,5	20	3,5	21
30	1200	15	1,5	20	3,2	19
30	1200	15	2,5	20	2,8	16
30	1200	15	0,5	40	3,1	20
30	1200	15	1,5	40	2,7	18
30	1200	15	2,5	40	2,3	16
45	600	15	0,5	20	3,7	25
45	600	15	1,5	20	3,5	23
45	600	15	2,5	20	3,1	20
45	600	15	0,5	40	3,3	24
45	600	15	1,5	40	3	21
45	600	15	2,5	40	2,8	20
45	1200	15	0,5	20	3,5	21
45	1200	15	1,5	20	3,3	18
45	1200	15	2,5	20	2,7	16
45	1200	15	0,5	40	3	19
45	1200	15	1,5	40	2,6	16
45	1200	15	2,5	40	2,1	15
30	600	22,5	0,5	20	3,8	26

Продолжение таблицы выборки экспериментальных данных

30	600	22,5	1,5	20	3,5	22
30	600	22,5	2,5	20	3,1	21
30	600	22,5	0,5	40	3,3	25
30	600	22,5	1,5	40	3	22
30	600	22,5	2,5	40	2,8	20
30	1200	22,5	0,5	20	3,4	21
30	1200	22,5	1,5	20	3,2	18
30	1200	22,5	2,5	20	2,8	15
30	1200	22,5	0,5	40	3	19
30	1200	22,5	1,5	40	2,6	18
30	1200	22,5	2,5	40	2,2	15
60	600	15	0,5	20	3,7	24
60	600	15	1,5	20	3,3	23
60	600	15	2,5	20	3	19
30	1500	15	0,5	20	3,1	19
30	1500	15	1,5	20	2,6	17
30	1500	15	2,5	20	2	15
30	900	15	0,5	20	3,6	24
30	900	15	1,5	20	3,3	22
30	900	15	2,5	20	3	18
30	900	30	0,5	20	3,6	23
30	900	30	1,5	20	3,2	22
30	900	30	2,5	20	2,9	17
30	900	30	0,5	50	3,2	19
30	900	30	1,5	50	2,7	17
30	900	30	2,5	50	2,2	14

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Патент на изобретение 2608729

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 608 729**⁽¹³⁾ **C2**

(51) МПК
A23L 2/395 (2006.01)
A23L 2/52 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014141885, 16.10.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.10.2014Дата регистрации:
23.01.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 16.10.2014

(43) Дата публикации заявки: 10.05.2016 Бюл. № 13

(45) Опубликовано: 23.01.2017 Бюл. № 3

Адрес для переписки:

650056, г. Кемерово, б-р Строителей, 47,
КемГИПП, патентовед Сырцева А.П.

(72) Автор(ы):

Тихонов Виктор Владимирович (RU),
Тихонов Николай Викторович (RU),
Тихонова Ирина Николаевна (RU),
Доня Денис Викторович (RU),
Миллер Екатерина Сергеевна (RU),
Попов Анатолий Михайлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2273446 C2, 10.04.2006. RU
2242145 C1, 20.12.2004. US 20080152779 A1,
26.06.2008.**(54) СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ИНСТАНТ-ПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ КОНЦЕНТРАТОВ ПЛОДОВО-ЯГОДНЫХ СОКОВ, СОДЕРЖАЩИХ РАЗЛИЧНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ДОБАВКИ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к области пищевой и пищекокцентратной промышленности для получения инстант-продуктов на основе концентратов плодово-ягодных соков, содержащих функциональные добавки, в частности для получения плодово-ягодных киселей. Способ характеризуется тем, что смешивают неводорастворимый компонент – крахмал с размером 10-100 мкм и концентрат плодово-ягодного сока с содержанием сухих веществ 44-57 мас. %, в полученную смесь добавляют водорастворимый компонент – смесь сахарной пудры и порошка лактозы в соотношении 5:1 или смесь сахарной пудры и глюкозы в соотношении 1:3. Затем осуществляют доувлажнение смеси водой или раствором 0,3-0,7 мас.% лимонной кислоты в течение 5-10 мин и

гранулирование. После чего сушат до остаточной влажности не более 14% и получают гранулы готового продукта. В неводорастворимый компонент может быть добавлен сухой ягодный шрот плодово-ягодного сока с размером частиц не более 0,1 мм в соотношении 10:1 или добавлена овсяная или рисовая мука. Кроме того, перед смешиванием в концентрат сока может быть добавлен витаминный премикс. Изобретение обеспечивает сокращение времени сушки влажных гранул, а также при приготовлении киселя позволяет получить гранулы с хорошей диспергируемостью гранул в горячей воде (90÷100°C) при перемешивании в течение 10÷15 с и получить напиток с однородной консистенцией. 3 н.п. ф-лы, 3 пр., 1 ил.

RU 2 608 729 C 2

RU 2 608 729 C 2

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
Патент на изобретение 2583817

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 583 817** ⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
B01J 2/14 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014141878/05, 16.10.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.10.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 16.10.2014

(45) Опубликовано: 10.05.2016 Бюл. № 13

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2209662 C2, 10.08.2003. SU 1517995
A1, 30.10.1989. RU 2105601 C1, 27.02.1998. US
4214863 A1, 29.07.1980. GB 1072328 A,
14.06.1967. EP 0359230 A1, 21.03.1990.

Адрес для переписки:

650056, г. Кемерово, б-р Строителей, 47,
КемТИПП, патентовед Сырцева А.П.

(72) Автор(ы):

Тихонов Виктор Владимирович (RU),
Тихонов Николай Викторович (RU),
Тихонова Ирина Николаевна (RU),
Доня Денис Викторович (RU),
Миллер Екатерина Сергеевна (RU),
Попов Анатолий Михайлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности" (RU)**(54) ТАРЕЛЬЧАТЫЙ СМЕСИТЕЛЬ-ГРАНУЛЯТОР ДЛЯ СМЕШИВАНИЯ
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ С ДОБАВКАМИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к устройству для получения многокомпонентных смесей с добавками вязкой жидкости и может быть использовано в пищевой, фармацевтической, химической и других отраслях промышленности, например для получения инстант-продуктов в пищевой промышленности. Смеситель-гранулятор состоит из наклонной тарели диаметра $D_{\text{тар}}$ с регулируемым углом наклона к горизонту, привода с возможностью регулирования частоты вращения n , активатора, установленного перпендикулярно дну тарели во второй ее четверти и вращающегося от собственного привода в направлении, противоположном вращению тарели, лопасти активатора выполнены в виде серповидных ножей, а в зоне 12 ч установлен диск размером

($0,5 \pm 0,55$) $D_{\text{тар}}$ с острой кромкой. В верхней части кромка диска отстоит от борта тарели с минимальным зазором. Отбойный нож и устройство для подачи жидкости находятся над плоскостью диска. Высота установки диска от дна тарели задает толщину слоя гарнисажа на дне тарели срезанием острой режущей кромкой вращающегося диска излишков налипающего на дно материала. В процессе смешивания вязкой жидкости и сыпучих компонентов наблюдается повышение степени однородности смеси и, как следствие, повышение качества и однородности по размеру получаемых гранул. Техническим результатом изобретения является увеличение выхода требуемых по размеру и плотности фракции гранул, повышение качества, сокращение времени гранулирования и сушки конечного продукта. 2 ил.

RU 2 5 8 3 8 1 7 C 1

RU 2 5 8 3 8 1 7 C 1

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Патент на изобретение 2491985

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 491 985** (13) **C1**

(51) МПК
B01J 2/14 (2006.01)
A23P 1/02 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012113847/02, 09.04.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.04.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 09.04.2012

(45) Опубликовано: 10.09.2013 Бюл. № 25

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2209662 C2, 10.08.2003. US 4214863 A, 29.07.1980. US 5994499 A, 30.11.1999. JP 4180825 A, 29.06.1992.

Адрес для переписки:

650056, г. Кемерово, б-р Строителей, 47,
КемТИПП

(72) Автор(ы):

Миллер Екатерина Сергеевна (RU),
Попов Александр Анатольевич (RU),
Попов Анатолий Михайлович (RU),
Сарафанов Александр Александрович (RU)

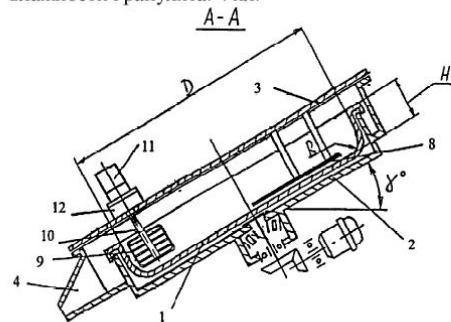
(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности (RU)**(54) ТАРЕЛЬЧАТЫЙ ГРАНУЛЯТОР С АКТИВАТОРОМ**

(57) Реферат:

Изобретение может быть использовано, например, в пищевой и фармацевтической отраслях промышленности. Тарельчатый гранулятор с активатором содержит наклонную тарель, установленную с возможностью вращения в корпусе с крышкой, привод тарели, загрузочный и разгрузочный патрубки гранулируемого материала, форсунки, пристенный и донный ножи, активатор с приводом вращения, установленный в крышке перпендикулярно дну тарели с зазором относительно дна и борта тарели. Привод активатора снабжен осевым вибратором. Активатор выполнен в виде стержня с рамками, установленными перпендикулярно движущемуся потоку гранулируемого материала, в которых радиально расположены пластины,

закрепленные в двух точках - на стержне и на рамке. Изобретение обеспечивает сокращение времени гранулирования, повышение выхода гранул фракции 0,75-2,5 мм, однородных по форме и плотности, а также снижение влажности гранулята. 4 ил.



Фиг. 1

RU 2 4 9 1 9 8 5 C 1

RU 2 4 9 1 9 8 5 C 1