

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

На правах рукописи



Зорина Татьяна Владимировна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОСМЕСИТЕЛЯ С РЕЦИКЛ КАНАЛОМ ДЛЯ
ПОЛУЧЕНИЯ МУЧНЫХ СЫПУЧИХ СМЕСЕЙ**

Направление 19.06.01 – промышленная экология и биотехнологии

Направленность 05.18.12 – процессы и аппараты пищевых производств

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Бородулин Дмитрий Михайлович,

доктор технических наук, профессор

Кемерово – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ МУЧНЫХ СЫПУЧИХ СМЕСЕЙ. ЛИТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНЫЙ ОБЗОР.....	9
1.1 Основы исследования процесса приготовления сыпучих смесей.....	9
1.2 Состояние современного смесеприготовительного оборудования.....	14
1.3 Обзор конструкций вертикальных вибрационных смесителей непрерывного действия	15
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО 1 ГЛАВЕ.....	33
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ МУЧНЫХ СЫПУЧИХ СМЕСЕЙ	34
2.1 Корреляционный анализ как метод оценки сглаживающей способности вибрационных смесителей	34
2.2 Моделирование смесителя вибрационного типа на основе корреляционного анализа	36
2.2.1 Моделирование прямоточного смесительного агрегата вибрационного типа.....	45
2.3 Корреляционный анализ вибросмесителя с рецикл каналом, реализующего метод «последовательного разбавления».....	47
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО 2 ГЛАВЕ.....	61
ГЛАВА 3. ОПИСАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ МУЧНЫХ СЫПУЧИХ СМЕСЕЙ	62
3.1 Описание лабораторно-экспериментального стенда.....	62
3.2 Дозирующее оборудование стенда.....	64
3.2.1 Шнековый дозатор.....	64
3.2.2 Порционный дозатор.....	65

3.3 Конструкция вибросмесителя с рецикл каналом, реализующего метод «последовательного разбавления».....	66
3.4 Рецептуры мучных сыпучих смесей, применяемых в исследованиях	69
3.5 Методики проведения экспериментальных исследований.....	71
3.5.1 Настройка угла вибрации.....	71
3.5.2 Контроль частоты вращения валов вибропривода.....	74
3.5.3 Методика определения качества смеси.....	74
3.5.4 Методика определения скорости вибротранспортирования мучной сыпучей смеси.....	76
3.5.5 Методика определения пропускной способности отверстий перфорации.....	77
3.5.6 Методика определения влияния параметров вибрации и массы смесителя на потребляемую мощность.....	77
3.5.7 Методика определения аминокислотного сора.....	78
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО 3 ГЛАВЕ.....	80
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОСМЕСИТЕЛЯ С РЕЦИКЛ КАНАЛОМ	81
4.1 Определение скорости вибротранспортирования мучной сыпучей смеси.....	81
4.2 Определение пропускной способности отверстий рабочего органа вибрационного СНД.....	84
4.3 Определение затрат энергии на смешивание.....	86
4.4 Определение рациональных параметров работы вибрационного смесителя для получения мучных сыпучих смесей.....	87
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО 4 ГЛАВЕ.....	107
ГЛАВА 5. ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ.....	108
5.1 Технологическая линия производства мучных сыпучих смесей. Опытно-промышленные испытания.....	108
5.2. Аминокислотный скор хлебобулочного изделия.....	111

5.3 Экономический расчет.....	113
РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО 5 ГЛАВЕ.....	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	190
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	217
ПРИЛОЖЕНИЕ И.....	220
ПРИЛОЖЕНИЕ К.....	222

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Актуальной для большинства стран, включая и Российскую Федерацию, является проблема сбалансированного питания. Для её решения предприятия пищевой промышленности выпускают полуфабрикаты в виде сыпучих композиций с повышенным содержанием белка для производства хлебобулочных изделий.

Многокомпонентность смесей позволяет сбалансировать их состав и разрабатывать готовые изделия, которые способны укреплять защитные свойства организма человека. Увеличение спроса на полуфабрикаты в виде мучных сыпучих смесей стимулирует рост масштабов их производства. А поскольку доля каждого компонента в общей массе мучной композиции в большинстве случаев не превышает 1:100, их смешивание целесообразно проводить по непрерывной схеме в винтовых вертикальных вибрационных смесителях. Именно в них получают мучные сыпучие смеси высокого качества. Смешение компонентов в данных смесителях непрерывного действия (СНД) происходит в тонком виброкипящем слое (20-50 мм) в связи с наличием развитого рабочего органа, который виброактивирует дисперсную систему. Это дает возможность значительно сократить время смешивания. Кроме того данные СНД хорошо сглаживают флуктуации материальных потоков.

Перечисленные достоинства естественным образом диктуют необходимость расширения линейки винтовых вибрационных смесителей (ВС) с целью максимального удовлетворения потребностей населения в производстве полуфабрикатов в виде мучных сыпучих смесей. Поэтому исследование нового вибрационного СНД для получения мучных сыпучих смесей, является актуальным.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями процесса смешивания сыпучих композиций в различных смесеприготовительных аппаратах занимались такие ученые, как Ю.И. Макаров, В.Н. Иванец, Д.М. Бородулин, М.Н. Орешина, Т.Г. Мартынова, А.Б. Капранова, М.Ю. Таршис, И.Я. Федоренко, В.В.

Садов, А.Б. Шушпанников, Г.Е. Иванец, Д.Н. Пирожков, А.А. Гнездилов, И.А. Бакин, Ю.Д. Видинеев, Д.А. Домащенко, С. Harwood, K. Walanski, E. Luebcke, D. Kuakpetoon, R. A. Flores, G. A Milliken, I. Bauman, D. Curic, M. Boban и др.

Цель работы. Разработка и исследование новой конструкции высокоэффективного вибросмесителя с рецикл каналом для получения мучных сыпучих смесей.

Задачи исследований:

1. провести литературно-патентный обзор существующих конструкций вибрационных СНД для выбора направления дальнейших исследований;

2. на основе корреляционного анализа разработать математическую модель процесса непрерывного смешивания в вибрационном СНД с рецикл каналом;

3. разработать конструкцию вибрационного СНД с рецикл каналом, реализующего метод «последовательного разбавления»;

4. определить рациональные технологические параметры работы вибрационного СНД с рецикл каналом для получения мучных сыпучих смесей заданного качества и степень влияния исследуемых параметров на качество получаемого продукта при помощи регрессионного анализа;

5. провести опытно-промышленные испытания вибрационного СНД с рецикл каналом в составе технологических линий получения мучных сыпучих смесей. Провести аминокислотный анализ хлебобулочного изделия из мучной сыпучей смеси, полученной в разработанном вибрационном СНД.

Объектом исследования являлась конструкция вибрационного СНД с рецикл каналом для получения мучных сыпучих смесей. **Предметом исследования** являлось определение рациональных технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом.

Научная новизна: получена математическая модель вибрационного СНД, реализующего метод «последовательного разбавления», на основе корреляционного анализа; установлено влияние параметров вибрации на качество готовых мучных сыпучих смесей, скорость их вибротранспортирования и расход через перфорацию; определены рациональные технологические параметры

вибрационного СНД с рецикл каналом, при которых получают мучные сыпучие смеси заданного качества.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в возможности применения в пищевой индустрии полученных на основе корреляционного анализа математических уравнений, которые описывают процесс смешивания в вибрационном СНД.

Практическая значимость работы: разработка вибрационного СНД с рецикл каналом (патент РФ 2626415), позволяющего получать мучные сыпучие смеси высокого качества; разработка аппаратного оформления технологических линий производства мучных сыпучих смесей высокого качества, включающих в свой состав вибросмеситель с рецикл каналом.

Методология и методы исследования. Методология выполнения исследования включает теоретическую, экспериментальную и практическую направленности. Использовались следующие методы исследования: поиск путей оптимизации работы вибросмесителя с рецикл каналом; математическое моделирование; корреляционный и регрессионный анализ; практическое применение вибрационного СНД в промышленных условиях.

Положения, выносимые на защиту: математическая модель процесса непрерывного смешивания в вибрационном СНД с рецикл каналом, созданная на основе корреляционного анализа; конструкция разработанного вибросмесителя (патент РФ 2626415); результаты исследований процесса смешивания мучных сыпучих смесей в вибрационном СНД с рецикл каналом; промышленная апробация разработанного вибрационного СНД.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения данной диссертации научно обоснованы, подтверждаются большим объемом экспериментальных данных и апробацией в условиях реального производства.

Основное содержание диссертации отражено в 17 работах, в том числе 1 публикация в международном издании, входящем в наукометрические базы данных Scopus, 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 патента РФ. Материалы диссертации обсуждены на: Международных научных

конференциях «Пищевые инновации и биотехнологии» (г. Кемерово, 2014-2018 гг.); Международной научно-практической конференции «Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств» (г. Воронеж, 2016 г.); Международном симпозиуме «Инновации в пищевой биотехнологии» (г. Кемерово, 2019 г.); Национальной конференции «Холодильная техника и биотехнологии» (г. Кемерово, 2019 г.).

В приложениях диссертации представлены акты испытаний вибрационного СНД с рецикл каналом, которые подтверждают практическую значимость результатов исследований.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, включающих литературно-патентный обзор, математическое моделирование процесса смешивания мучных сыпучих смесей, аппаратурное и методологическое оформление процесса смешивания, результаты экспериментальных исследований, промышленную реализацию, результаты и выводы, заключение, список литературы (174 наименования) и приложений. Основной текст изложен на 117 страницах. Работа содержит 32 таблицы и 46 рисунков.

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ МУЧНЫХ СЫПУЧИХ СМЕСЕЙ. ЛИТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНЫЙ ОБЗОР

Процессы смешения мучных сыпучих смесей широко распространены в пищевой, фармацевтической, химической и других отраслях промышленности. Смесительное оборудование отличается большим конструктивным разнообразием и принципами действия.

В первой главе проанализировано современное состояние и отражены перспективы развития смесеприготовительного оборудования, приведены критерии оценки качества смеси, а также представлен обзор существующих конструкций вертикальных смесителей непрерывного действия вибрационного типа.

1.1 Основы исследования процесса приготовления сыпучих смесей

Анализ публикаций, которые посвящены процессам смешивания сыпучих смесей, отображает все трудности этого процесса [20, 23, 32, 34, 42, 45, 62, 72, 97, 120, 121, 141, 142, 145, 164, 172].

Для начала рассмотрим модели идеального смешения и идеального вытеснения.

В случае, если происходит поршневое продвижение смеси вдоль смесительного агрегата без перемешивания частиц в направлении этого перемещения, то имеет место быть модель идеального вытеснения. Кроме того, учитывается, что компоненты смеси распределены равномерно в перпендикулярном движению направлении. Уравнение модели идеального вытеснения можно записать следующим образом:

$$\partial c / \partial t = - W(\partial c / \partial x), \quad (1.1)$$

где c - концентрация ключевого компонента в фоновом;

t - время;

W - линейная скорость потока;

x - координата.

Если в смесительном агрегате компоненты мгновенно распределяются равномерно по всему объему, то имеет место быть модель идеального смешения. Уравнение модели идеального смешения можно записать с помощью следующего уравнения:

$$dc/dt = (Q/V)(c_{вх} - c_{вых}), \quad (1.2)$$

где Q - объемная скорость подачи компонентов в смесительный агрегат;

V - внутренний объем смесительного агрегата, через который протекает поток;

$c_{вх}$ и $c_{вых}$ - концентрация ключевого компонента во входящем потоке и на выходе из смесительного агрегата.

Модель идеального смешения не соответствует процессу перемешивания компонентов, который в действительности наблюдается в смесительных агрегатах для перемешивания сыпучих компонентов, так как в таком аппарате коэффициент неоднородности смеси равен нулю, как равно нулю и время смешивания. Идеальных потоков не существует в практике – это всего лишь абстракция, которую достаточно удобно использовать для анализа протекания различных процессов [45].

Реальный процесс смешения сыпучих композиций можно представить как объемное перемещение частиц определенного количества компонентов для образования однородной среды (по физико-механическим свойствам, составу и др.). Для смешивания сыпучих материалов нужно приложить значительные внешние усилия, которые позволяют частичкам смешиваемых компонентов передвигаться друг относительно друга [34, 45, 74-76, 141-143, 164].

Процесс смешения носит случайный характер. В связи с этим, большинство методик оценки характера смешения берут за основу методы статистического анализа [16, 26-28, 35, 36, 44, 51, 88, 94, 96].

Для оценки качества полученной смеси А.М. Ластовцев предложил использовать метод определения коэффициента неоднородности по одному ключевому компоненту. При применении данного метода все смеси принято считать двухкомпонентными. Для этого выделяют из смеси ключевой и фоновый (основной) компоненты. Качество получаемой сыпучей смеси определяют по степени распределения ключевого компонента в массе фонового.

Требования, предъявляемые к ключевому компоненту: его содержание в смеси должно быть в небольшом количестве, его физические свойства должны быть отличаемы от остальных компонентов, а так же необходимо, чтобы его содержание в пробе можно было достаточно просто определить [23, 38, 50, 87, 91, 130, 146, 147, 169].

Неоднородность смеси, получаемой в смесителе непрерывного действия, зависит от ряда причин:

1. подача исходных компонентов в вибрационный смеситель осуществляется неравномерно;
2. при недостаточном смешении сыпучей смеси возникает отклонение распределения частиц компонентов от среднего.
3. присутствие в сыпучей композиции конгломератов компонентов.

Для сравнительной оценки перемешивающих устройств используют такие понятия, как эффективность и интенсивность перемешивания.

Эффективность перемешивания определяется количеством энергии, которую необходимо затратить на достижение технологического эффекта. На нее влияют гранулометрический состав смеси (размеры, форма и т.д.), плотность исходных компонентов, состояние поверхности частиц и их влажность, силы трения и т.д. [30, 144].

Интенсивность перемешивания - это время, которое необходимо для достижения заданного технологического результата. Интенсификация процессов

смешения, как правило, приводит к уменьшению размеров аппарата и увеличению его производительности [22, 25, 58, 59, 112, 154, 159].

Известен ряд способов смешения компонентов.

Периодическое смешивание осуществляется в течение некоторого времени и состоит из следующих стадий: 1) Конвективное смешение; 2) Диффузионное смешение; 3) Сегрегация частиц.

Конвективное и диффузионное смешение направлены на улучшение качества смеси, т.е. на распределение частиц в смеси равномерно, в то время как сегрегация частиц, наоборот, ее ухудшает. Все эти процессы в аппарате происходят одновременно, однако в различные периоды смешения они играют разную роль. В самом начале процесса на уровне макрообъемов смеси преобладает конвективное смешение, т.е. происходит переход гранул из слоя в слой за счет составляющей вектора скорости, которая в данный момент не зависит от физико-химических свойств частиц ингредиентов. На данном этапе важную роль играет характер движения рабочих органов аппарата и соответственно сыпучей композиции, объем аппарата, его параметры и конструкция. Смешивание считается диффузионным, если передвижения частиц относительно друг друга осуществляется случайным образом и в различные стороны. Диффузионное смешение в этот период незначительно, так как граница раздела между ингредиентами смеси невелика. На данный момент скорость смешения высока.

После распределения ингредиентов смеси по всему объему аппарата начинает преобладать диффузионное смешение, которое протекает на уровне микрообъемов. После чего, наряду с диффузионным смешением, на процесс начинает влиять сегрегация частиц. Затем наступает момент, когда эти процессы уравнивают друг друга, и, следовательно, дальнейшее смешение больше не имеет смысла и процесс необходимо закончить.

Альтернативой периодическому способу смешения может служить непрерывный поточный метод. Из-за того, что компоненты одновременно смешиваются и транспортируются к разгрузочному патрубку, достигая однородности, метод непрерывного смешения легче поддается автоматизации.

Необходимо отметить, что величина скорости диффузионного смешивания значительно увеличивается в смесителях непрерывного действия (СНД). Этот факт неоспоримо ведет к улучшению качества готового продукта, что доказывает целесообразность использования подобных конструкций СНД. Однако из-за непрерывной подачи компонентов смеси дозаторами дискретного действия создаются неоднородности состава итоговой смеси на выходе из смесительного агрегата. Поэтому так необходимо, чтобы смеситель обладал хорошей сглаживающей способностью.

С увеличением расходов ингредиентов, т.е. когда доля «ключевого» компонента к «фоновому» становится более чем 1:100, получать смесь заданного качества становится все труднее. В этом случае «ключевой» ингредиент сначала смешивается с частью «фонового», а затем с основной массой. Метод «последовательного разбавления» позволяет сдвигать ограничения в соотношениях расходов составляющих композиции в сторону больших значений. Принципиально этот способ в смесителях периодического действия может быть реализован путем подачи компонентов в аппарат в определенной последовательности, т.е. с разрывом во времени. А в СНД данный метод осуществить значительно сложнее, т.к. требуется подача ингредиентов в разные его зоны [20, 32, 39, 49, 63, 69, 73, 79, 84, 85, 90, 117, 120, 136, 158].

Проведем сравнительный анализ смесителей непрерывного и периодического действия.

1) В смесителях непрерывного действия интенсивность смешивания в 3-4 раза выше, чем в смесителе периодического действия. Это связано с тем, что в СНД образуется большое количество потоков сыпучей смеси меньшего сечения с возросшими в них усилиями и деформациями сдвига.

2) Температура компонентов смеси в СНД равна 85 - 95 °С, что объясняется большей поверхностью охлаждения, в то время как в смесителях периодического действия она составляет 120 - 140 °С.

3) В связи с тем, что в СНД потребляемая мощность в течение всего процесса смешения постоянно, то это дает возможность снизить мощность электродвигателя на 30 - 40 %.

1.2 Состояние современного смесеприготовительного оборудования

Многие исследователи достаточно давно занимаются изучением оборудования для производства сыпучих смесей. Многим из них удалось обосновать теоретически и внедрить данное оборудование, отличающееся конструктивным разнообразием и принципами действия, в различные отрасли [16, 19, 20, 21, 32, 33, 39, 41, 49, 55, 64, 66-68, 79, 81, 84-86, 90, 98, 109-111, 113, 117, 119-121, 123, 125, 136, 138, 149, 152, 161, 162]. Рассмотрим более подробно смесители, отличающиеся по виду подводимой энергии.

Барабанные смесители. Корпус барабанных смесителей выполнен в виде цилиндра, имеющего небольшой угол наклона к горизонту. Процесс смешения происходит в радиальном направлении. Достоинства: простота аппаратного оформления. Недостатки – слишком большие размеры и высокое энергопотребление, не наилучшее качество итоговой сыпучей смеси [81, 149, 157].

Пневматические смесители. Работа пневматических смесителей осуществляется за счет давления сжатого газа. Достоинства: быстрое получение конечной сыпучей смеси хорошего качества, имеют высокую демпфирующую способность. Недостатки: возможно смешивания компонентов только близких по дисперсности, необходимы дополнительные устройства для очистки от пыли [172].

Гравитационные смесители получили наибольшее распространение в строительстве. Рабочим органом является смесительный барабан. Достоинства: достаточная однородность смесей [151].

В лопастных смесителях возможно смешивание увлажненных материалов, паст и сухих сыпучих материалов. Рабочими органами являются 2 вала. В данных

смесителях для смешения компонентов служат спирали, лопатки, прерывистые витки шнека, винтовые ленты, которые закреплены на валах [19].

Центробежные смесители. Рабочим органом центробежного смесителя является закрепленный на валу (внутри корпуса) полый конический ротор. В данных аппаратах вихревые потоки компонентов сыпучей смеси возникают вследствие взаимодействия центробежных сил и сил трения, которые действуют при движении смешиваемых компонентов по кольцевым траекториям [17, 27, 32, 113].

Вибрационные смесители применяются для получения однородной массы в сыпучих или порошкообразных составах. Конструкция смесителя представляет собой цилиндр (рабочая камера), электрическим приводом, с верхним, имеющим герметичную крышку и служащим для загрузки перемешиваемых компонентов, и нижним отверстиями. В данных смесителях смешивание ингредиентов смеси происходит в трёхмерном пространстве. Благодаря этому данный процесс происходит в течение короткого промежутка времени, и смесь получается достаточно высокого качества. Преимущества, которые выгодно отличают вибрационные смесители от подобного оборудования: хорошая производительность, эффективный процесс смешения, высокое качество готовых смесей, простота эксплуатации и регулировки, низкая загрязняющая способность, небольшие габариты. Благодаря достойным техническим характеристикам, своей простоте, качеству перемешивания и компактным габаритам вибрационные смесители получили широчайшее применение во всех отраслях промышленности [21, 33, 39, 55, 66-68, 86, 90, 98, 109, 134, 136-138].

1.3 Обзор конструкций вертикальных вибрационных смесителей непрерывного действия

Каскадные вибрационные смесители. Известен вибрационный смеситель а.с. 1456212, представленный на рисунке 1.1., целью которого является повышение эффективности процесса смешения. Данная цель достигается

концентричным расположением патрубков подвода компонентов смеси, которые закреплены в корпусе распределительными тарелками, имеющими равный диаметр. Перегородки выполнены в виде колец, снабженных бортиками с щелевыми прорезями, и дисков, которые закреплены в корпусе посредством вертикальных стоек, прикрепленных к днищу корпуса [5].

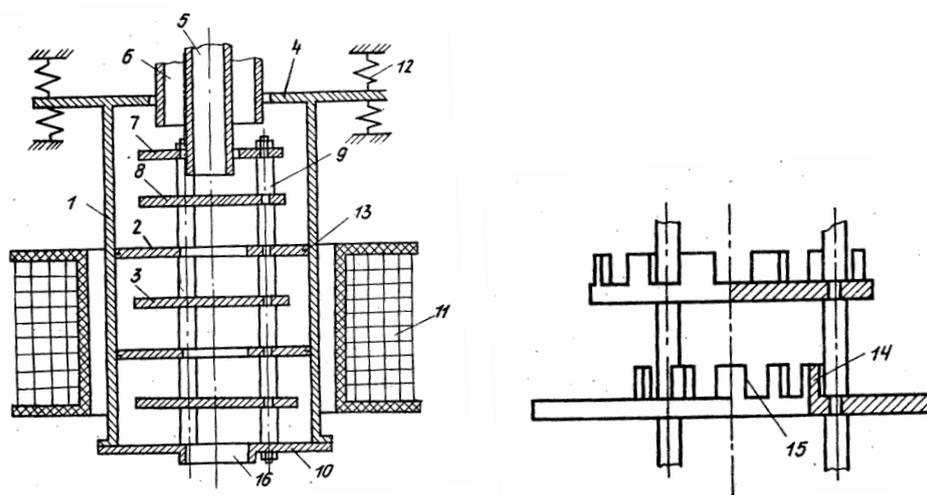


Рисунок 1.1 - Вибрационный смеситель, а.с. 1456212

(1 - корпус; 2 и 3 - поперечные перегородки; 4 - крышка корпуса; 5 и 6 - патрубки подвода компонентов смеси; 7 и 8 - распределительные тарелки; 9 - вертикальные стойки; 10 - днище; 11 - электромагнитная катушка; 12 - пружины; 13 - уплотнение; 14 - бортики; 15 - щелевые прорези)

Известен вибрационный смеситель а.с. 655419 (рисунок 1.2), целью которого является интенсификация процесса перемешивания за счет создания однородности продукта и исключение гранулирования. Она достигается модернизацией конструкции перемешиваемого устройства и некоторых узлов смесителя. Перфорированные перемешивающие элементы направлены расширяющейся частью вверх, вследствие чего обеспечивается хорошее накопление сыпучих компонентов в смесителе. Под действием вертикальных колебаний часть смеси проваливается на нижележащие тарелки через их перфорацию, не успев полностью распределиться в массе материала, находящегося на первой тарелке, тем самым достигается интенсивное продольное перемешивание материала во всем аппарате.

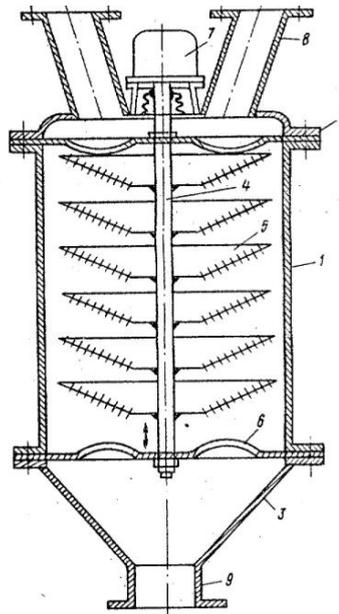


Рисунок 1.2 - Вибрационный смеситель, а.с. 655419

(1 –корпус; 2 – крышка; 3 – днище; 4 – шток; 5 – конусообразные тарелки с перфорацией; 6 – упругие крестовины; 7 – вибратор; 8 – штуцера; 9 – патрубок)

Недостатками смесителя а.с. 655419 являются закупоривание отверстий перфорированных тарелок при транспортировке сыпучего материала из-за возможного попадания гранулированных частиц. Материал накапливается на тарелках и способствует "захлебу" смесителя, после чего, начинает просыпаться в зазор между внутренней поверхностью корпуса аппарата и наружными кромками перфорированных тарелок. В результате конечный продукт получается низкого качества и нарушается работоспособность аппарата [13].

Известен вибрационный смеситель а.с. 919720, представленный на рисунке 1.3. Целью данного вибрационного смесителя является интенсификация процесса и повышение производительности путем просеивания и рециркуляции компонентов. Рассматриваемый вибрационный смеситель отличается от предыдущего смесителя а.с. 655419 тем, что в его центральной части коаксиально по оси корпуса установлен перевернутый цилиндрический стакан, внутри которого расположен перфорированный цилиндр с конической тарелкой. Помимо этого, на днище перфорированного цилиндра соосно закреплен вал-шнек, осуществляющий рециркуляцию смешиваемых компонентов. Кроме этого, смеситель оборудован мелющими телами.

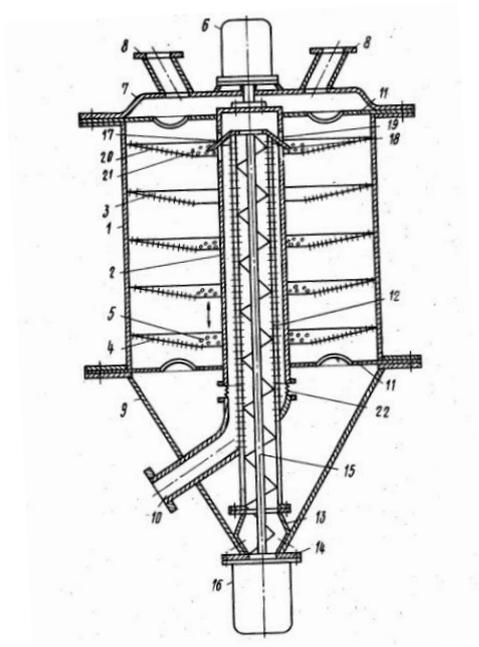


Рисунок 1.3 - Вибрационный смеситель, а.с. 919720

(1 – цилиндрический корпус; 2 – вертикальный шток; 3 – набор обратных конических тарелок с перфорацией; 4 – последняя обратная коническая тарелка с перфорацией; 5 – мелющие тела; 6 – вибратор; 7 – крышка; 8, 10 – штуцера; 9 – днище в виде конуса; 11 – упругие крестовины; 12 – цилиндр; 13 – стойки; 14 – крышка днища; 15 – шнек; 16 – электродвигатель; 17 – направляющая конической тарелкой; 18 – лепестки; 19 – выгрузочные отверстия; 20 – верхняя обратная коническая тарелка с перфорацией; 21 – металлические шарики; 22 – упругий рукав)

Недостатки смесителя: происходит закупорка отверстий перфорированного цилиндра при перемещении смешиваемой сыпучей смеси на верхнюю перфорированную тарелку, что приводит к нарушению соотношения между приходом и расходом материала; происходит накапливание смешиваемого материала на верхней тарелке, что способствует "захлебу" смесителя; образуются застойные зоны из-за проникновения агломератов, превышающих размер отверстий в тарелках. Эти недостатки уменьшают производительность смесительного агрегата и приводят к нарушению его работоспособности [15].

Известен вибрационный смеситель а.с. 1558449, представленный на рисунке 1.4, целью которого является повышения качества смеси. Она достигается установкой внутри цилиндрического корпуса криволинейных вогнутых тарелок с отверстиями разных размеров. Благодаря разнице в диаметрах отверстия,

создается опережающий поток, так как просеивание смешиваемого материала осуществляется быстрее через отверстия большего диаметра. Затем компоненты смеси, проходящие через меньшие отверстия, нагоняют и накладываются на опережающий поток, благодаря чему, улучшается продольное перемешивание между тарелками.

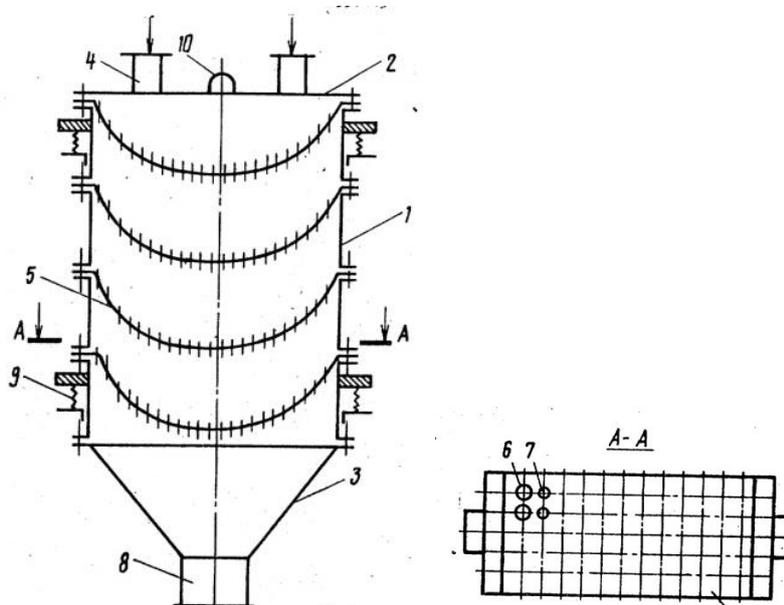


Рисунок 1.4 - Вибрационный смеситель, а.с. 1558449

(1 – цилиндрический корпус; 2- крышка корпуса; 3 – днище смесителя; 4,8 – загрузочный и разгрузочный штуцера; 5 – криволинейные вогнутые тарелки с отверстиями разного диаметра; 6, 7 – большие и малые отверстия; 9 – упругие подвески; 10 – вибратор)

Недостатки: ограниченность применения, т.к. качественные готовые смеси в данном аппарате можно получать только из близких по физико-механическим свойствам компонентов [8].

Следующий вибрационный смеситель а.с. 1115790, представленный на рисунке 1.5, отличается от а.с. 919720 наличием устройства для возврата смешиваемых компонентов, выполненного в виде ступенчатого шнека с направляющими тарелками. Кроме того авторы снабдили уплотнительными кольцами, из антифрикционного материала, наружные кромки перфорированных тарелок и установили турбулизатор [4].

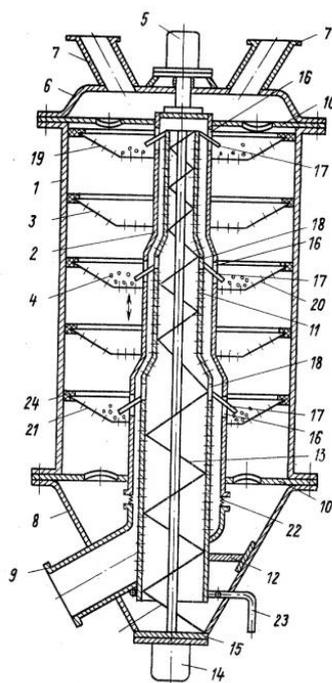


Рис.1.5 - Вибрационный смеситель, а.с. 1115790

(1– цилиндрический корпус; 2- ступенчатый шток; 3, 19, 20, 21 – обратные конические тарелки с перфорацией; 4 – мелющие тела; 5 – вибратор; 6 – крышка корпуса; 7,9 – загрузочные и выгрузочные штуцера; 8 – днище аппарата; 10 – упругие крестовины; 11 – ступенчатый цилиндр с перфорацией; 12 – кронштейн; 13 – шнек; 14 – электродвигатель; 15 – крышка корпуса; 16 – направляющие тарелки; 17 – лепестки; 18 – окна разгрузочные; 22 – упругий рукав; 23 – турбулизатор; 24 – уплотнительное кольцо)

Известен вибрационный смеситель а.с. 1590128, представленный на рисунке 1.6, целью которого является повышение качества смеси и расширение диапазона регулирования производительности. Она достигается тем, что рабочий орган выполнен в виде параллельных дисков с чередующимися секторами (перфорированными и сплошными), совершающих винтовые колебания. Дополнительно в смесителе установлено устройство регулировки площади перфорации. Основным недостатком является малое соотношение компонентов [9].

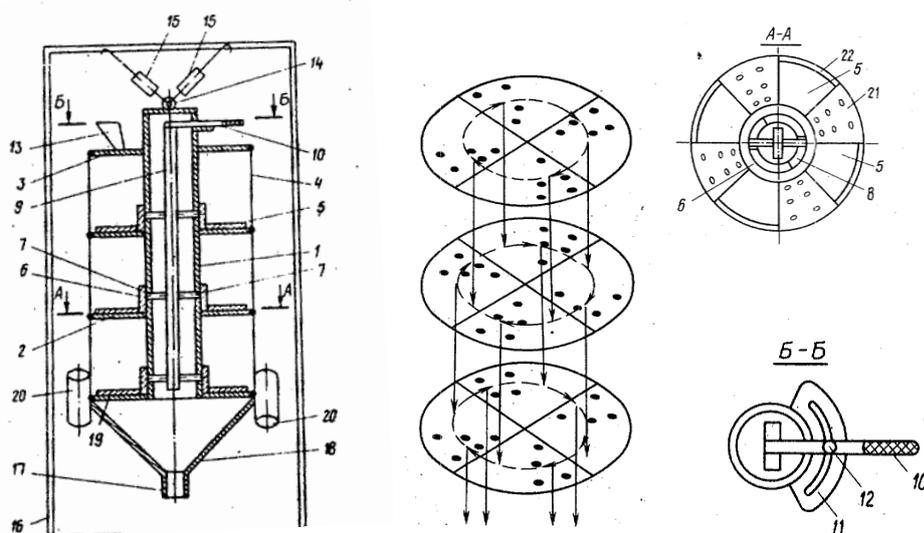


Рисунок 1.6 – Вибрационный смеситель, а.с. 1590128

(1 – вертикальный шток; 2 – диски с перфорацией; 3 – верхний диск без перфорации; 4 – корпус смесителя; 5 – секторные пластины; 6 – кольцо; 7 – пальцы; 8 – вырезы; 14 – несущее кольцо; 15 – амортизаторы; 16 – рама; 18 – выходная часть конуса; 19 – нижний виток с перфорацией; 20 – вибраторы; 21, 22 – перфорированные и сплошные сектора)

Известен вибрационный смеситель а.с. 912251, представленный на рисунке 1.7, целью которого является повышение производительности, интенсивности смешивания поликомпонентных потоков и стабильности устройства в работе. Цель достигается установкой конических перфорированных тарелок, которые закреплены на валу эксцентрично и снабжены распределителями (концентрические конические перегородки) и коническими перфорированными поддонами с жестко закрепленными на них стержнями, которые размещены в отверстиях тарелок. Конические перфорированные поддоны установлены с возможностью вертикального перемещения [14].

Даже не смотря на всю привлекательность идей, которые заложены в конструкции каскадных вибрационных смесителей [4, 5, 8, 9, 13-15], им необходима серьезная модернизация, т.к. в основу их работы положено транспортирование сыпучих компонентов под воздействием колебаний через перфорацию рабочего органа. Т.е. весь поступающий в аппарат сыпучий материал $m_{вх}$ должен просачиваться сквозь отверстия $m_{отв}$. Аналитически это можно представить следующим образом:

$$m_{\text{вх}} = m_{\text{отв}} \cdot \quad (1.3)$$

Практика показывает, что такой материальный баланс невозможно осуществить в связи с тем, что расход материала через отверстия $m_{\text{отв}}$ неустойчивая величина.

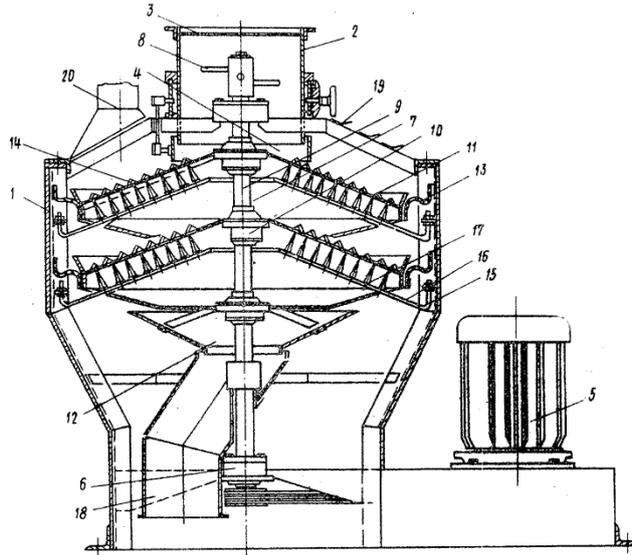


Рисунок 1.7 - Вибрационный смеситель, а.с. 912251

- (1 – станина; 2 – питающий патрубок; 3 – распределительная решетка;
 4 – телескопический регулятор; 5 – привод; 6 – подшипниковые опоры; 7-вертикальный вал; 8 – штифтовой разрыхлитель; 9 – группа эксцентриковых втулок; 10 – подшипники;
 11 – конические перфорированные тарелки; 12 – конический сборник;
 13 - противокрутные упругие подвески; 14 – распределители; 15 – регулировочные подвески; 16 – неподвижные конические перфорированные поддоны; 17 – стержни;
 18 – выпускной патрубок; 19 – жалюзийные решетки; 20 – аспирационный патрубок)

Кроме того, все представленные каскадные вибрационные смесители работают при низком соотношении компонентов, обладают невысокой производительностью и степенью сглаживания, т.к. реализовать рециркуляцию в этих смесителях крайне сложно. Лишь благодаря локальным циркуляционным потокам внутри сыпучей смеси происходит распределение частиц на тарелках между компонентами. За счет отверстий перфорации различных диаметров происходит создание опережающих потоков, растягивающих концентрационные

отклонения по высоте аппарата. Всё вышеперечисленное незначительно влияет на сглаживание флуктуаций [55].

Винтовые вибрационные смесители. Объектами наших исследований являлись вибрационные смесители, которые имеют несущую колонну в виде цилиндра, на внешней поверхности которой закреплен винтовой лоток (перфорированный рабочий орган). Они бывают прямоточные [3, 6, 10, 12] и подъемные [11, 100-105, 107].

Основной поток дисперсного материала в лотковых аппаратах прямоточного типа движется по лоткам, а опережающий – просыпается через отверстия перфорации витков. При этом достижение необходимого качества смешивания происходит по высоте СНД сверху вниз.

Основной поток дисперсного материала в лотковых аппаратах подъемного типа движется по спиральным лоткам снизу вверх. А материал, который просыпается на нижлежащие витки через отверстия перфорации, создает рециркулирующий поток.

Серьезным шагом в создании высокоэффективных вибрационных СНД стали прямоточные лотковые вертикальные СНД вибрационного типа [3, 6, 10, 12], рабочим органом которых является винтовой перфорированный желоб, представленный на рисунке 1.8.

Рециркулирующий поток сыпучих компонентов в данных смесителях перемещается по виткам спирального рабочего органа вниз («прямая» рециркуляция) или вверх («обратная» рециркуляция), что создает эффект запаздывания. Движение материала по рабочему органу осуществляется за счет направленной возвратно-поступательной вибрации. Каждая частица потока получает толчок под несколько большим углом, чем угол наклона рабочего органа, затем зависает в воздухе. За время ее полета желоб принимает исходное положение, а частица получает новый толчок и т.д. Изменение параметров вибрации (угла, частоты и амплитуды колебаний), геометрических размеров винтового рабочего органа (шага витков, наружного и внутреннего диаметров желоба) и перфорацию витков (количество, диаметр и форма отверстий)

предоставляет возможность регулировать соотношение потоков (основного и рециркулирующего).

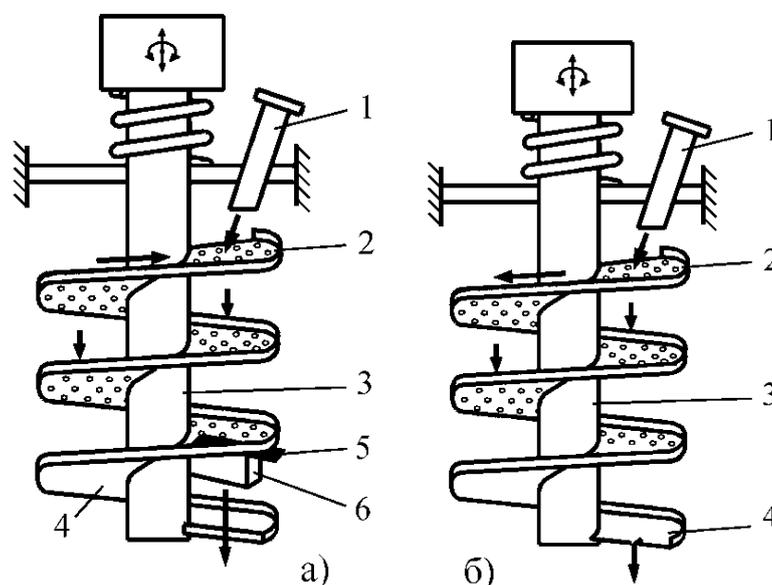


Рисунок 1.8 - Лотковые вертикальные вибрационные СНД:

а) с «обратной» рециркуляцией; б) с «прямой» рециркуляцией

(1,6 – загрузочный и выпускной патрубки; 2,4 – винтовой перфорированный и сплошной лотки; 3 – несущая колонна; 5 – заслонка)

Рассмотрим лотковые вертикальные вибрационные смесители с «прямой» рециркуляцией. Известен вибрационный смеситель а.с. 1674943, представленный на рисунке 1.9, целью которого было уменьшение габаритов и упрощение конструкции смесителя с одновременным увеличением выхода готового продукта. Из-за отсутствия конического днища для сбора материала корпус утратил несущую функцию. Данный вибрационный смеситель имеет ряд особенностей: во-первых, благодаря рециркуляции повышается эффективность процесса смешения компонентов смеси; во-вторых, имеет возможность регулирования соотношения потоков за счет изменения параметров вибрации, добиваясь получения более качественной смеси; в-третьих, подвижная пластина, которая установлена под нижним перфорированным витком, даёт возможность регулировать величину рециркуляции, изменив живое сечение патрубка.

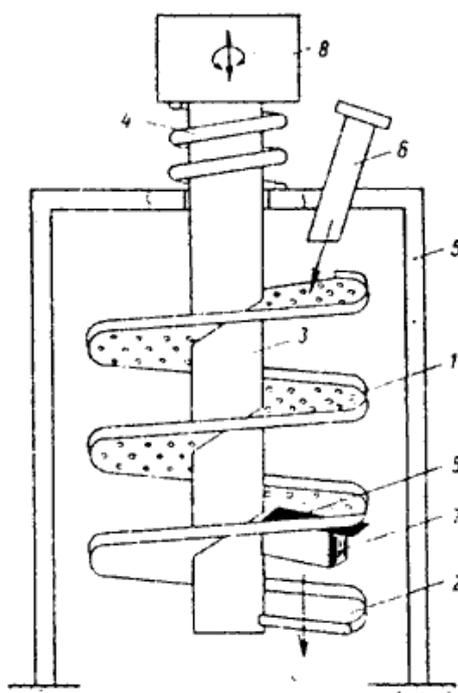


Рисунок 1.9 – Вибрационный смеситель, а.с. 1674943

(1 – перфорированный желоб; 2 – сплошной виток; 3 – вертикальная трубчатая колонна; 4 – амортизирующие элементы; 5 – несущая конструкция; 6 и 7 – патрубки ввода и вывода; 8 – вибратор; 9 – подвижная пластина)

Главным недостатком является ограниченность применения. Кроме того, часть объема слоя приводится только в виброожиженное, а не виброкипящее состояние из-за образования вакуума под виброкипящим слоем. Также в данном смесителе не предусмотрено регулирование высоты слоя от которого зависит качество смешения и, в случае её дестабилизации, может произойти «захлебывание» смесителя, что приведет к его аварийной остановке. Как следствие, могут возникнуть значительные неоднородности в структуре виброкипящего слоя, что значительно ухудшает качество готового продукта. Кроме того, смесителю присуща низкая стабильность процесса смешивания сыпучих материалов, вследствие чего, при значительных флуктуациях потоков смешиваемых компонентов или изменении их физико-механических свойств процесс смешения нарушается [10].

Известен вибрационный смеситель а.с. 1793956, представленный на рисунке 1.10, в котором решен один недостаток предыдущего изобретения. Целью является более надежная стабилизация процесса смешения компонентов смеси. Она достигается тем, что смеситель содержит рабочий орган в виде перфорированного спирального желоба, патрубки ввода и вывода компонентов смеси, амортизирующие элементы и вибратор. Наружная стенка спирального желоба изготовлена с перфорированными участками и расположена под некоторым углом наклона. Участки, имеющие перфорацию, чередуются со сплошными, что не позволяет частицам материала проскакивать смеситель, не участвуя в процессе смешения [12].

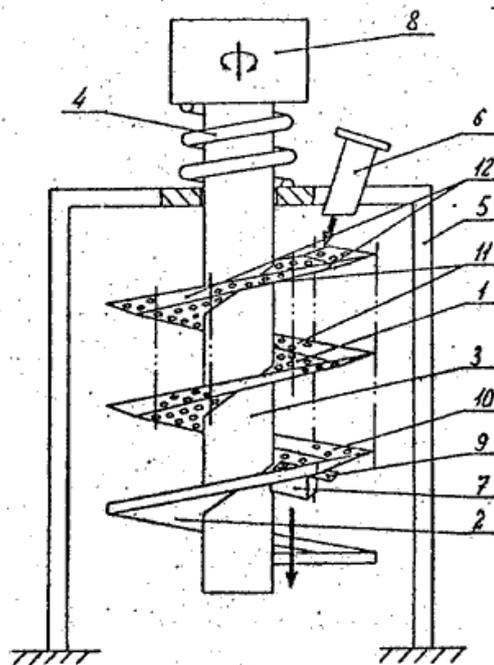


Рисунок 1.10 - Вибрационный смеситель а.с. 1793956

(1 – спиральный перфорированный желоб; 2 – сплошной виток; 3 – вертикальная трубчатая колонна; 4 – амортизирующие элементы; 5 – несущие конструкции; 6, 7 – патрубки ввода и вывода; 8 – вибратор; 9 – подвижная пластина; 10 – наружная стенка желоба; 11, 12 – перфорированные и сплошные участки наклонной стенки)

Прямоточные лотковые вертикальные вибрационные смесители с «прямой» рециркуляцией способны работать в широком диапазоне значений коэффициента рециркуляции ($0 < \alpha < 1$) при относительно равной загрузке всех витков, кроме

верхнего. Так же, такой смесительный агрегат обладает большей производительностью, нежели смеситель с «обратной» рециркуляцией, при тех же заданных технологических параметрах (размер перфорации, габаритные размеры, геометрия рабочего органа). Это связано с тем, что скорость потока дисперсного материала гораздо выше под уклон, чем на подъем. Но исследования многих ученых доказали, что это приводит к уменьшению сглаживающей способности смесителя. Проведенные эксперименты на лотковых вертикальных ВС с «прямой» рециркуляцией показывают, что в этих аппаратах получаются смеси хорошего качества при соотношении ингредиентов до 1:50 с похожими физико-механическими характеристиками.

На основании принципа работы лотковых вертикальных вибрационных смесителей с «прямой» рециркуляцией были разработаны подъемные лотковые вибрационные смесители непрерывного действия. Они имеют рециклы: внутренний и внешний. Этим смесителям не знакомы такие понятия, как нестабильность работы, эффект «захлебывания» и низкая сглаживающая способность.

Известен вибрационный смеситель а.с. 1716697, конструкция которого представлена на рисунке 1.11. Он послужил прототипом для разработки целого ряда конструкций [100-104].

Смеситель представляет собой цилиндрический корпус 1 с вертикальной колонной 3, служащей загрузочным бункером. Между ними находится перфорированный рабочий орган 2, выполненный в виде спиральной лопасти. Перемещение компонентов смеси осуществляется вверх, при этом происходит просеивание части компонентов на витки, расположенные ниже (контур «внутреннего» рецикла). Заслонка б, находящаяся на верхнем витке, выполняет функцию деления смеси на две части: первая часть выходит из аппарата; вторая часть перемещается обратно в бункер (контур «внешнего» рецикла). Этот аппарат обладает большей универсальностью и способен смешивать ингредиенты с большим различием их физико-механических характеристик [11].

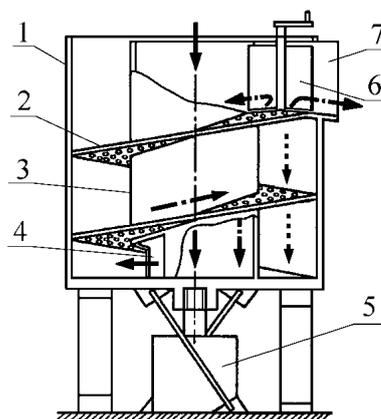


Рисунок 1.11 - Лотковый подъемный ВС а.с. 1716697

На рисунке 1.12 представлена схема движения смешиваемых компонентов в подъемном лотковом вертикальном вибрационном СНД. Свежие порции ингредиентов с суммарным расходом m_0 (кг/с) постоянно подаются в аппарат, а на выходе получают готовую смесь в том же количестве $m_{\text{вых}}$. В то же время, если коэффициенты внутренней α и внешней β рециркуляции >0 , то количество дисперсной фазы m_i , движущейся по виткам, больше значения m_0 ($m_i > m_0$), и возрастает с их увеличением. Следовательно, производительность тем выше, чем меньше α и β при прочих равных условиях. Однако в этом случае снижаются его сглаживающая и накопительная способности.

В случае изменения суммарного расхода материала через отверстия перфорации ($\Sigma m_{\text{отв}}$), которые могут быть вызваны изменением свойств сыпучей смеси, параметров вибрации (угла, амплитуды, частоты колебания), флуктуациями питающих потоков (m_0) и другими факторами, не происходит нарушение равновесия системы. Однако, если происходит увеличение суммарного расхода отверстий ($\Sigma m_{\text{отв}}$), то начинает возрастать высота виброкипящего слоя на нижних витках смесителя. Это способствует росту массовой производительности и, через определенный промежуток времени система снова стабилизируется. Это явление носит название отрицательной обратной связи.

Горизонтальная амплитуда колебаний частей смесителя равна нулю в центре и прямо пропорциональна удалению их от его оси, а вертикальная

амплитуда неизменна для всех её частей. Угол между результирующей амплитудой и горизонтом, изменяется от 90° в центре до 0° на периферии.

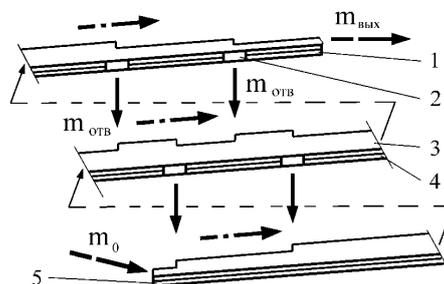


Рисунок 1.12 - Схема движения смешиваемых компонентов в подъемном лотковом вертикальном вибрационном СВД:

(1 – верхний виток; 2 – перфорация; 3 – виброкипящий слой сыпучей смеси; 4 – средний(ие) виток(ки); 5 – нижний виток)

Для устранения этого эффекта была разработана следующая конструкция вибрационного смесителя (патент №2181664), представленная на рисунке 1.13. Авторами была поставлена цель: повысить качество итоговой смеси. Она достигается тем, что к перфорированной спиральной лопасти прикреплен загрузочный бункер, образующий желоб. Загрузочный бункер имеет два оппозитно расположенных отверстия. Соосно с бункером установлена вставка, выполненная в виде тела вращения, которая позволяет предотвратить образование «застойных зон». Между вставкой и загрузочным бункером расположена заслонка, которая организывает дополнительный контур рециркуляции смешиваемых материалов. На верхнем витке перфорированной лопасти установлен отсекатель, который позволяет регулировать объем материала, поступающего в контур внешней рециркуляции. Авторы утверждают, что такая конструкция позволит повысить качество смеси [100].

Известен вибрационный смеситель а.с. 2193916, представленный на рисунке 1.14, целью которого является повышение качества смеси. Цель достигается изменением прямоугольного профиля спиральной перфорированной лопасти на полусферический. Авторы считают, что с помощью данного изменения создается

виброкипящий слой одинаковой интенсивности. Кроме того, на периферии полусферической лопасти изготавливаются дополнительные отверстия с меньшим и с большим в 2 раза диаметрами, в сравнении с отверстиями, выполненными в днище лопасти. Последние делаются для отправления некоторого количества компонентов смеси на нижнюю лопасть с целью стабилизации его высоты [101].

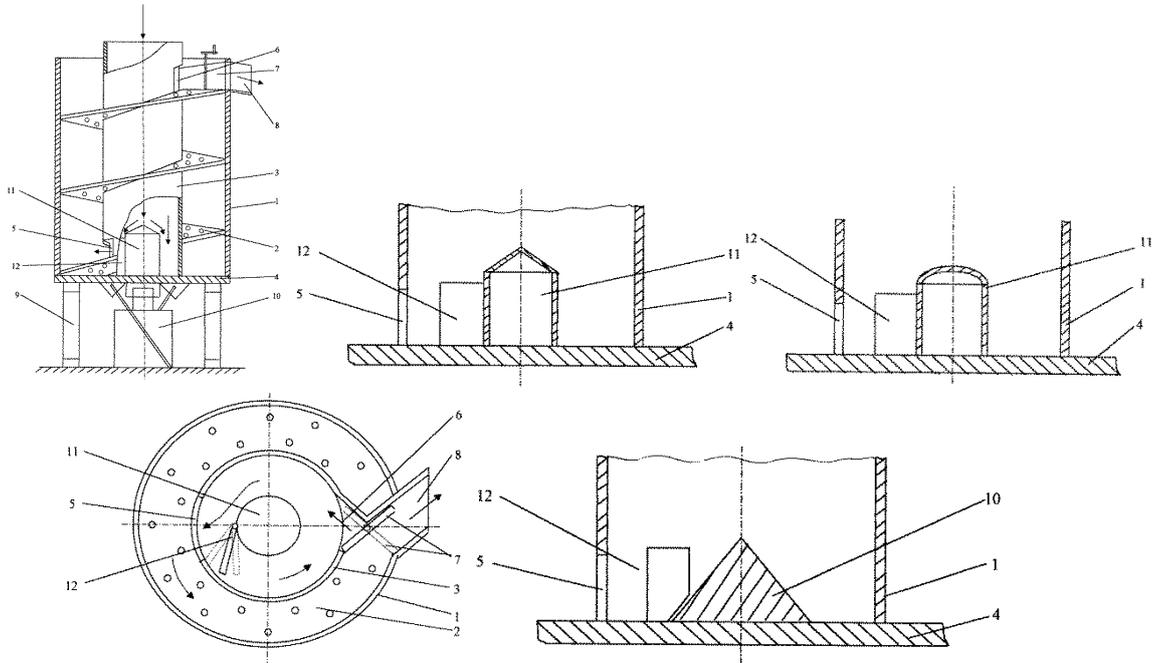


Рисунок 1.13 - Вибрационный смеситель, патент 2181664

(1 – корпус; 2 – перфорированная спиральная лопасть; 3 – загрузочный бункер; 4 – днище; 5, 6 – нижнее и верхнее отверстия; 7 – рассекатель; 8 – выгрузочный патрубок; 9 – упругие элементы; 10 – вибропривод; 11 – вставка в виде тела вращения; 12 – заслонка)

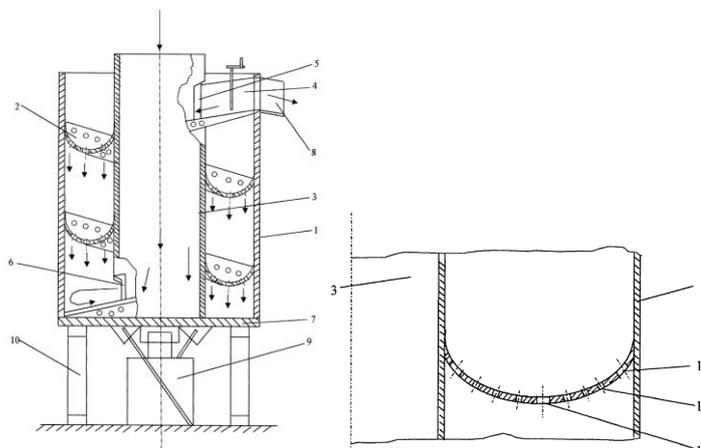


Рисунок 1.14 - Вибрационный смеситель, а.с. 2193916

(1 – корпус; 2 – спиральная полусферическая лопасть с перфорацией; 3 – загрузочное устройство; 4 – отсекающий; 5 и 6 – окна; 7 – днище; 8 – разгрузочный патрубок; 9 – вибропривод; 10 – упругие элементы; 11, 12 и 13 – отверстия)

Известен вибрационный СНД (патент № 2286203), представленный на рисунке 1.15, целью которого является рост производительности аппарата и качества итоговой сыпучей смеси без увеличения габаритов конструкции. Она достигается путем установки спиральной лопасти на вставке, которая образует желоб с наклоном в сторону движения сыпучей смеси. Спиральная лопасть может содержать как один, так и несколько витков. Все витки, кроме нижнего, являются перфорированными. Эта модернизация позволяет устранить «застойную» зону в загрузочном бункере. Благодаря этому повышается качество смеси и снижается энергопотребление.

Недостатки: наличие более плотного слоя сыпучей смеси на нижнем сплошном витке, по сравнению с перфорированными витками [103].

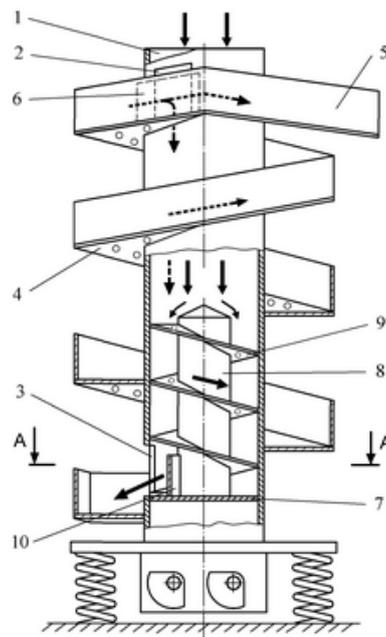


Рисунок 1.15 - Вибрационный смеситель, патент 2286203

- (1 – цилиндрический загрузочный бункер; 2, 3 – верхнее и нижнее отверстия;
4 – спиральный желоб с перфорированными витками; 5 – выгрузочный патрубок;
6 – подвижная заслонка; 7 – дно загрузочного бункера; 8 – цилиндрическая вставка;
9 – лопасть; 10 – неподвижная заслонка)

Известен вибрационный смеситель (патент 2209109), представленный на рисунке 1.16, целью которого является повышение качества смеси. Установленная

цель достигается усовершенствованием загрузочного бункера. Он сделан с отверстиями, расположенными параллельно направляющей подъема желоба аппарата. Изготовление внутри загрузочного бункера цилиндрической вставки делает возможным отделение входящих потоков сыпучих материалов от потоков смеси, которые попадают через окна загрузочного бункера и отверстия [102].

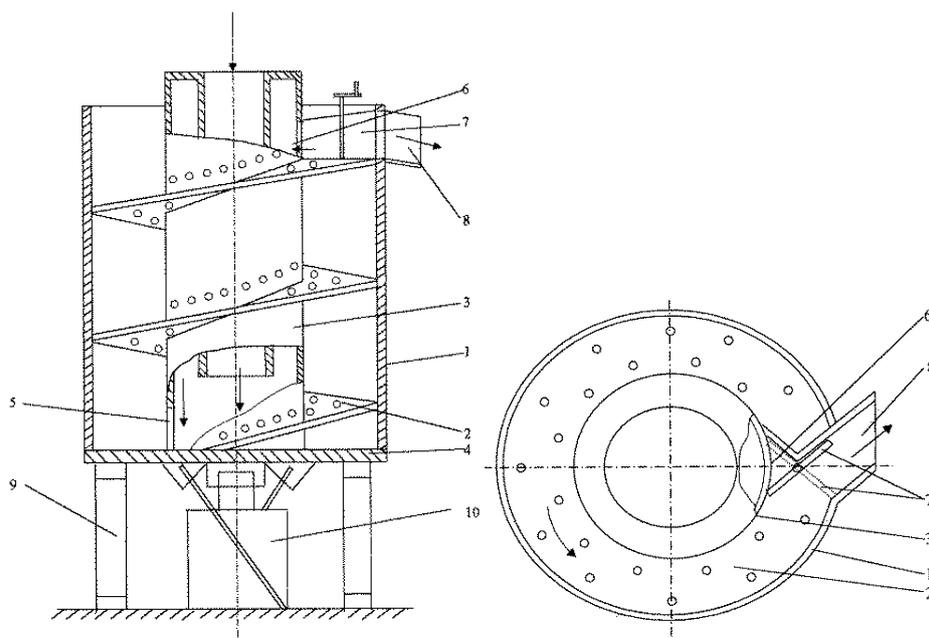


Рисунок 1.16 - Вибрационный смеситель, патент 2209109

(1 – цилиндрический корпус; 2 – перфорированный желоб; 3 – загрузочный бункер; 4 – днище; 5, 6 – нижнее и верхнее окна; 7 – отсекатель; 8 – выгрузочный патрубков; 9 – упругие элементы; 10 – вибропривод; 11 – отверстия)

При анализе лотковых вибрационных смесителей мы пришли к выводам, что они обладают низкими удельными энергозатратами, способностью значительно сглаживать флуктуации питающих потоков, высокой интенсивностью процесса смешивания, способны вырабатывать готовый продукт хорошего качества при перемешивании смесей с отличительными физико-механическими свойствами, незначительным истиранием материала при его движении по рабочему органу.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО 1 ГЛАВЕ

1. Каскадные вибрационные смесители ограничены в применении, могут работать только при низком соотношении смешиваемых компонентов, обладают невысокой производительностью и степенью сглаживания.

2. Среди СНД вибрационного типа для получения мучных сыпучих смесей преобладают лотковые вертикальные смесители, которые способны смешивать материалы с различными физико-механическими свойствами.

3. В отличие от смесителей периодического действия, в смесителях непрерывного действия: в 3-4 раза возрастает интенсивность смешивания; в 1,5 раза ниже температура смешиваемой мучной сыпучей смеси; ниже потребляемая мощность и стоимость установки. Следовательно, для получения мучных сыпучих смесей целесообразнее использовать смесители непрерывного действия.

4. СНД вибрационного типа обладают рядом преимуществ, которые выгодно выделяют их от подобного смесеприготовительного оборудования: высокое качество готовых мучных сыпучих смесей; эффективный процесс смешения; хорошая производительность; низкая загрязняющая способность; простота эксплуатации и регулировки; небольшие габариты. Следовательно, для получения мучных сыпучих смесей необходимо использовать смесители вибрационного типа.

Подводя итог выше изложенному, можно сделать вывод, что для получения высококачественных мучных сыпучих смесей целесообразно использовать лотковые вертикальные подъемные СНД вибрационного типа.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ МУЧНЫХ СЫПУЧИХ СМЕСЕЙ

С ростом неравномерности непрерывной подачи сыпучих компонентов смесителю всё сложнее обеспечивать требуемое качество композиции. Одним из путей уменьшения влияния этого фактора является создание в аппарате контуров рециркуляции и опережения потоков. На этом принципе нами разработан вибрационный смеситель [107], обладающий высокой сглаживающей способностью. В то же время при отсутствии контуров характер движения в них дисперсной фазы по рабочему органу подобен течению жидкости в трубчатых аппаратах (модель идеального вытеснения). Поэтому моделировать процесс смешивания мучных сыпучих смесей и сравнивать сглаживающие способности устройств в этом случае удобно с помощью корреляционного анализа [36, 44, 51, 88].

2.1 Корреляционный анализ как метод оценки сглаживающей способности вибрационных смесителей

При моделировании процессов непрерывного смешивания корреляционный анализ использовали Иванец В.Н., Бородулин Д.М., Бакин И.А., Иванец Г.Е., Грачев Ю.П., Шушпанников А.Б., Орехова Т.Н., Закгейм А.Ю., Akiyama T., Kurimoto H., Aubin J., Ferrando M., Jiricny V., Mizonov V., Berthiaux H. и другие [18, 31, 35, 48, 52, 56, 57, 60, 61, 65, 96, 111, 131, 140, 141, 148, 155, 160, 165-167, 170, 174].

Известно, что во время процесса смешивания мучной сыпучей смеси в смесительном агрегате между ее частицами создается причинно-следственная связь (если меняется распределение одной величины, то меняется распределение и другой). Для оценки данной величины используют такие понятия, как дисперсия, математическое ожидание и коэффициент корреляции. Уравнения материального баланса отображают перемещения мучной сыпучей смеси от

начала процесса смешивания (входящий сигнал) и до его окончания (выходящий сигнал). Описание материальных потоков мучной сыпучей смеси осуществляется случайными функциями $X(t)$. Затем находят вероятностные характеристики сигналов (входящего и выходящего). Благодаря этим характеристикам подбирают топологию материальных потоков сравнением отношений их дисперсий или среднеквадратичных отклонений.

$$S = \sigma_{x_0}^2 / \sigma_{x_B}^2 \quad \text{или} \quad s = \sigma_{x_0} / \sigma_{x_B} \quad (2.1)$$

где S, s – сглаживающая способность аппарата;

$\sigma_{x_0}^2$ и $\sigma_{x_B}^2$ – дисперсии входного и выходного сигналов;

σ_{x_0} и σ_{x_B} – среднеквадратичные отклонения сигналов.

Для моделирования процессов непрерывного смешивания введем условные обозначения:

$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ – количество витков основного и дополнительного рабочих органов смесителя;

t – текущее время;

$X_0(t) = X_0, X_B(t) = X_B$ – массовый расход мучной сыпучей смеси на входе в аппарат и выходе из него, соответственно;

$X_{0B}(t) = X_{0B}$ – массовый расход мучной сыпучей смеси, которая поступает на нижний неперфорированный виток основного рабочего органа с нижнего неперфорированного витка дополнительного рабочего органа;

$X_i(t) = X_i$ – массовый расход мучной сыпучей смеси, сходящей с i -го витка основного рабочего органа;

$X_j(t) = X_j$ – массовый расход мучной сыпучей смеси, сходящей с j -го витка дополнительного рабочего органа;

ρX_0 – часть массового расхода фонового компонента и всего трассера;

δX_0 – часть массового расхода фонового компонента, подаваемого на второй виток перфорированного дополнительного рабочего органа;

$(1-\rho)X_0$ – оставшаяся часть массового расхода фонового компонента, при выполнении необходимого условия $0 < \rho < 1$.

$(1-\rho-\delta)X_0$ – оставшаяся часть массового расхода фонового компонента, при выполнении необходимого условия $(\rho+\delta) \leq 1$.

α_i - коэффициент «внутренней» рециркуляции, $0 \leq \alpha_{ki} \leq 1$;

β_i – коэффициент «внешней» рециркуляции, $0 \leq \beta_i \leq 1$;

γ_i, γ_j - коэффициенты «опережающей» рециркуляции, $0 \leq \gamma_i \leq 1, 0 \leq \gamma_j \leq 1$;

τ – интервал корреляции;

$Kx_i(\tau) = Kx_i, Kx_j(\tau) = Kx_j$, – корреляционные функции материальных потоков;

$\sigma_{x_0}^2 = Kx_0(0), \sigma_{x_B}^2 = Kx_B(0)$ – дисперсии входящего и выходящего потоков.

2.2 Моделирование смесителя вибрационного типа на основе корреляционного анализа

Созданная на основе корреляционного анализа математическая модель дает возможность найти зависимость между отклонениями входного и выходного сигналов. Если известны дисперсии входного сигнала, значения времени нахождения компонентов смеси внутри смесителя и коэффициенты рециркуляции, то, благодаря математическому моделированию, можно прогнозировать однородность мучной сыпучей смеси на выходе из смесительного агрегата [31, 131, 139]. Из раздела 1.4.2 данной диссертации было выяснено, что при непрерывной подаче мучной сыпучей смеси в аппарат наиболее рационально использование подъемных лотковых СНД, т.к. они имеют большую сглаживающую способность.

Рассмотрим схемы движения материальных потоков в данных смесителях. Примем за ячейку один из витков рабочего органа.

Принцип работы первого аппарата (Патент 2181664): ингредиенты поступают на нижний виток смесителя, где под действием направленной вибрации начинают перемещаться по винтовому рабочему органу вверх. В это же

время, поступающие на виток компоненты, просыпаются через перфорацию на нижерасположенный виток, создавая контур "внутреннего" рецикла. После того, как аппарат заполнится необходимым количеством мучной сыпучей смеси заданного качества, через выгрузочный патрубок выгружают одну часть итогового продукта, а другую сбрасывают на нижний виток, тем самым образуя контур «внешнего» рецикла [100]. Предыдущими исследователями уже был применен корреляционный анализ для данной конструкции в ряде работ [65, 111], поэтому приведем только схему движения материальных потоков внутри аппарата, представленную на рисунке 2.1.

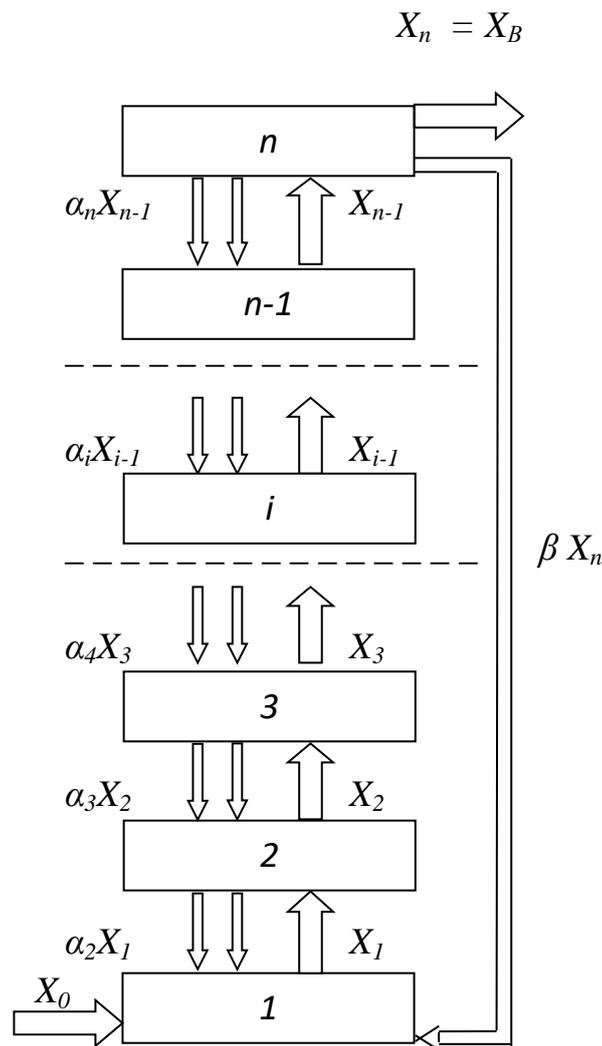


Рисунок 2.1 – Схема движения материальных потоков в подъемном винтовом смесителе

Выясним, как влияет «внутренняя» и «внешняя» рециркуляции на сглаживающие способности СНД. Для этого воспользуемся системой уравнений материального баланса.

Материальный баланс для компонентов смеси, движущихся по основному рабочему органу описывается системой уравнений (2.2):

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = X_0 + \alpha_2 X_1 + \beta X_n \\ X_2 = X_1 + \alpha_3 X_2 - \alpha_2 X_1 \\ X_3 = X_2 + \alpha_4 X_3 - \alpha_3 X_2 \\ \text{-----} \\ X_i = X_{i-1} + \alpha_{i+1} X_i - \alpha_i X_{i-1} \\ \text{-----} \\ X_{n-1} = X_{n-2} + \alpha_n X_{n-1} - \alpha_{n-1} X_{n-2} \\ X_n = X_{n-1} - \alpha_n X_{n-1} - \beta X_n \\ X_B = X_{n-1} - \alpha_n X_{n-1} - \beta X_n \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Система, определяющая корреляционные функции n витков примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Kx_1(\tau) = Kx_0(\tau) + \alpha^2_2 Kx_1(\tau) + \beta^2 Kx_n(\tau) \\ Kx_2(\tau) = Kx_1(\tau) + \alpha^2_3 Kx_2(\tau) - \alpha^2_2 Kx_1(\tau) \\ Kx_3(\tau) = Kx_2(\tau) + \alpha^2_4 Kx_3(\tau) - \alpha^2_3 Kx_2(\tau) \\ \text{-----} \\ Kx_i(\tau) = Kx_{i-1}(\tau) + \alpha^2_{i+1} Kx_i(\tau) - \alpha^2_i Kx_{i-1}(\tau) \\ \text{-----} \\ Kx_{n-1}(\tau) = Kx_{n-2}(\tau) + \alpha^2_n Kx_{n-1}(\tau) - \alpha^2_{n-1} Kx_{n-2}(\tau) \\ Kx_n(\tau) = Kx_{n-1}(\tau) - \alpha^2_n Kx_{n-1}(\tau) - \beta^2 Kx_n(\tau) \\ Kx_B(\tau) = Kx_{n-1}(\tau) - \alpha^2_n Kx_{n-1}(\tau) - \beta^2 Kx_n(\tau) \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Примем коэффициент «внутренней» рециркуляции равным между собой, (т.е. $\alpha_2 = \dots = \alpha_n = \alpha$), тогда, решая систему уравнений (2.3) относительно $Kx_B(\tau)$ получим следующее выражение (2.4):

$$Kx_B(\tau) = \frac{Kx_0(\tau)(1-\beta)^2(1-\alpha)^{2(n-1)}}{(1-\alpha^2)^{n-1} - \beta^2(1-\alpha)^{2(n-1)}} \quad (2.4)$$

Рассмотрим второй винтовой вертикальный вибрационный смеситель (Патент 2286203), схема движения материальных потоков которого представлена на рисунке 2.2.

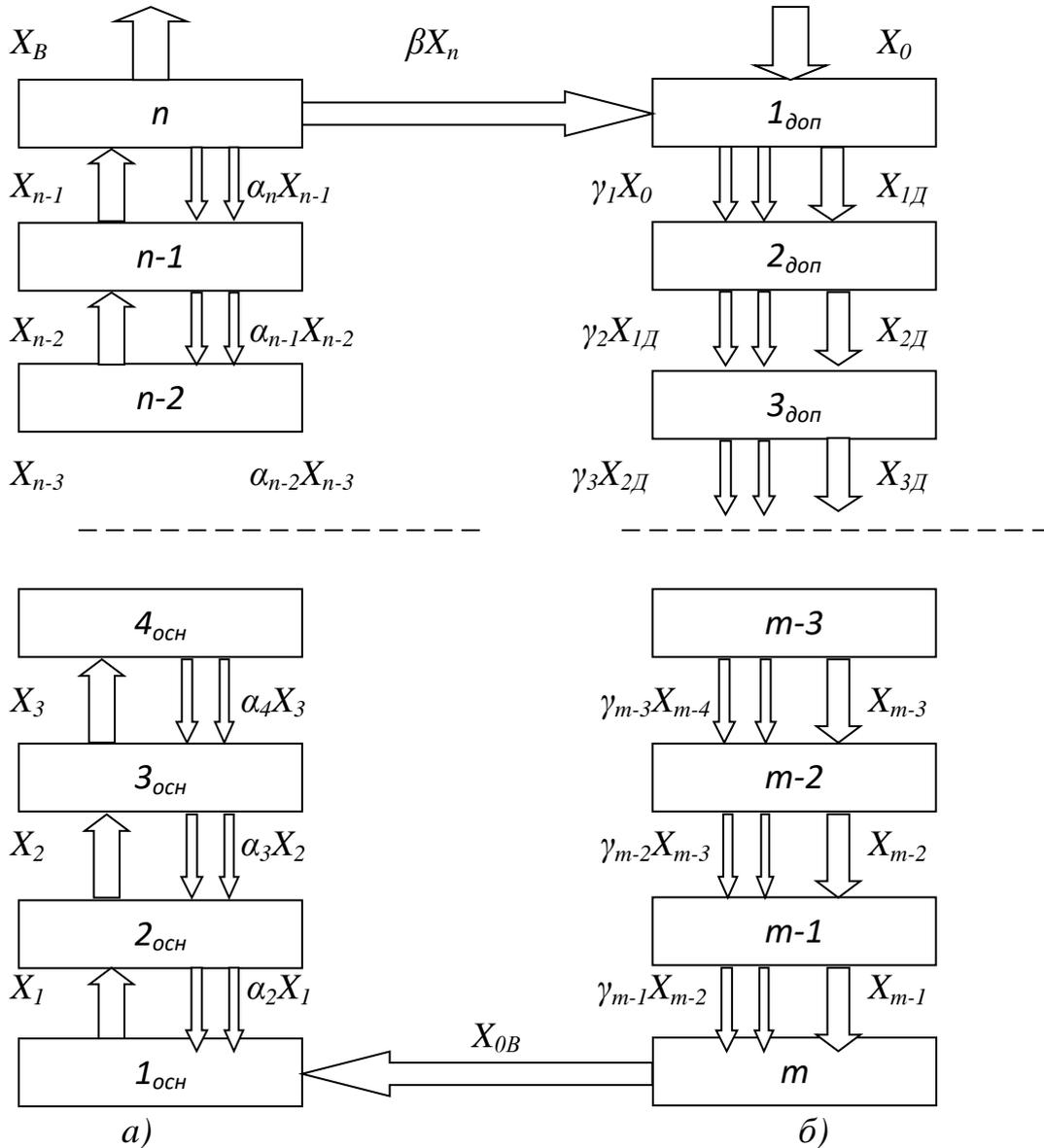


Рисунок 2.2 - Схема движения материальных потоков

а) основной рабочий орган; б) дополнительный рабочий орган

Дисперсный материал подается сверху в бункер, после чего одна его часть скатывается по внутреннему дополнительному рабочему органу, а другая просыпается через перфорацию, тем самым, опережая основной поток. Далее ингредиенты поступают к отверстию в стенке бункера и отправляются на внешний основной рабочий орган, где они под углом поднимаются вверх. Одновременно, при помощи перфорации часть материала с вышележащих витков

поступает на нижележащие, создавая, тем самым межвитковую рециркуляцию на дополнительном рабочем органе. При достижении последнего витка рабочего органа одна часть готового продукта поступает на выгрузочный патрубок, а другая отсекается и возвращается на дополнительный рабочий орган [103].

Материальный баланс для материала, движущегося по дополнительному и основному рабочим органам, описываются системами уравнений (2.5, 2.6):

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = X_0 + \beta X_n - \gamma_1 X_0 \\ X_2 = X_1 + \gamma_1 X_0 - \gamma_2 X_1 \\ X_3 = X_2 + \gamma_2 X_1 - \gamma_3 X_2 \\ \dots \\ X_j = X_{j-1} + \gamma_{j-1} X_{j-2} - \gamma_j X_{j-1} \\ \dots \\ X_{m-1} = X_{m-2} + \gamma_{m-2} X_{m-3} - \gamma_{m-1} X_{m-2} \\ X_m = X_{m-1} + \gamma_{m-1} X_{m-2} \\ X_{0B} = X_{m-1} + \gamma_{m-1} X_{m-2} \end{array} \right. \quad (2.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = X_{0B} + \alpha_2 X_1 \\ X_2 = X_1 + \alpha_3 X_2 - \alpha_2 X_1 \\ X_3 = X_2 + \alpha_4 X_3 - \alpha_3 X_2 \\ \dots \\ X_i = X_{i-1} + \alpha_{i+1} X_i - \alpha_i X_{i-1} \\ \dots \\ X_{n-1} = X_{n-2} + \alpha_n X_{n-1} - \alpha_{n-1} X_{n-2} \\ X_n = X_{n-1} - \alpha_n X_{n-1} - \beta X_n \\ X_B = X_{n-1} - \alpha_n X_{n-1} \end{array} \right. \quad (2.6)$$

Корреляционные функции для систем уравнений (2.5, 2.6) будут иметь вид (2.7, 2.8) соответственно:

$$\left\{ \begin{array}{l} Kx_1(\tau) = Kx_0(\tau) - \gamma_1^2 Kx_0(\tau) \\ Kx_2(\tau) = Kx_1(\tau) + \gamma_1^2 Kx_0(\tau) - \gamma_2^2 Kx_1(\tau) \\ Kx_3(\tau) = Kx_2(\tau) + \gamma_2^2 Kx_1(\tau) - \gamma_3^2 Kx_2(\tau) \\ \dots \\ Kx_j(\tau) = Kx_{j-1}(\tau) + \gamma_{j-1}^2 Kx_{j-2}(\tau) - \gamma_j^2 Kx_{j-1}(\tau) \\ \dots \\ Kx_{m-1}(\tau) = Kx_{m-2}(\tau) + \gamma_{m-2}^2 Kx_{m-3}(\tau) - \gamma_{m-1}^2 Kx_{m-2}(\tau) \\ Kx_m(\tau) = Kx_{m-1}(\tau) + \gamma_{m-1}^2 Kx_{m-2}(\tau) \\ Kx_{0B}(\tau) = Kx_{m-1}(\tau) + \gamma_{m-1}^2 Kx_{m-2}(\tau) \end{array} \right. \quad (2.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Kx_1(\tau) = Kx_{0B}(\tau) - \alpha_2^2 Kx_1(\tau) \\ Kx_2(\tau) = Kx_1(\tau) + \alpha_3^2 Kx_2(\tau) - \alpha_2^2 Kx_1(\tau) \\ Kx_3(\tau) = Kx_2(\tau) + \alpha_4^2 Kx_3(\tau) - \alpha_3^2 Kx_2(\tau) \\ \dots \\ Kx_i(\tau) = Kx_{i-1}(\tau) + \alpha_{i+1}^2 Kx_i(\tau) - \alpha_i^2 Kx_{i-1}(\tau) \\ \dots \\ Kx_{n-1}(\tau) = Kx_{n-2}(\tau) + \alpha_n^2 Kx_{n-1}(\tau) - \alpha_{n-1}^2 Kx_{n-2}(\tau) \\ Kx_n(\tau) = Kx_{n-1}(\tau) - \alpha_n^2 Kx_{n-1}(\tau) \\ Kx_B(\tau) = Kx_{n-1}(\tau) - \alpha_n^2 Kx_{n-1}(\tau) \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Научными деятелями [21, 58, 134] было доказано, что число витков основного рабочего органа не рационально принимать больше восьми, поэтому рассмотрим схему движения материала для $m=6$ и $n=6$.

Решив системы уравнений (2.7, 2.8) относительно $Kx_B(\tau)$ получим:

$$Kx_B(\tau) = Kx_0(\tau) \cdot [((\gamma_1^2 + (1-\gamma_1))^2 \cdot (\gamma_2^2 + (1-\gamma_2))^2 \cdot (\gamma_3^2 + (1-\gamma_3))^2 \cdot (\gamma_4^2 + (1-\gamma_4))^2 \cdot (\gamma_5^2 + (1-\gamma_5))^2 \cdot (1-\alpha_7)^2 \cdot (1-\alpha_8)^2 \cdot (1-\alpha_9)^2 \cdot (1-\alpha_{10})^2 \cdot (1-\alpha_{11})^2 \cdot (1-\beta)^2) / ((1-\alpha_7^2) \cdot (1-\alpha_8^2) \cdot (1-\alpha_9^2) \cdot (1-\alpha_{10}^2) \cdot (1-\alpha_{11}^2) \cdot (\gamma_1^2 + (1-\gamma_1))^2 \cdot (\gamma_2^2 + (1-\gamma_2))^2 \cdot (\gamma_3^2 + (1-\gamma_3))^2 \cdot (\gamma_4^2 + (1-\gamma_4))^2 \cdot (\gamma_5^2 + (1-\gamma_5))^2 \cdot (1-\alpha_7)^2 \cdot (1-\alpha_8)^2 \cdot (1-\alpha_9)^2 \cdot (1-\alpha_{10})^2 \cdot (1-\alpha_{11})^2 \cdot \beta^2)] \quad (2.9)$$

Примем коэффициенты рециркуляции и опережения равными между собой, т. е. $\alpha_1 = \dots = \alpha_n = \alpha$, $\gamma_1 = \dots = \gamma_m = \gamma$. Тогда выражение (2.9) примет вид:

$$Kx_B(\tau) = Kx_0(\tau) \left(\frac{(\gamma^2 + (1-\gamma))^{10} \cdot (1-\alpha)^{10} \cdot (1-\beta)^2}{((1-\alpha^2)^5 - (\gamma^2 + (1-\gamma))^{10} \cdot (1-\alpha)^{10} \cdot \beta^2)} \right) \quad (2.10)$$

Третий, рассматриваемый нами аппарат (Патент 2547486) работает следующим образом: компоненты смеси проступают на верхний дополнительный винтовой рабочий орган, где транспортируется вниз и через перфорацию отправляется на нижний перфорированный виток основного рабочего органа аппарата. Затем компоненты смеси перемещаются вверх, благодаря направленной вибрации. Когда смесь достигает последнего витка рабочего органа, то с помощью выгрузочного патрубка одна часть выходит из смесителя, а другая просеивается через отверстия перфорации на витки, расположенные ниже [105].

Так как дополнительный рабочий орган ничем не отличается от предыдущего, то рассмотрим только схему движения материальных потоков на основном рабочем органе (рисунок 2.3).

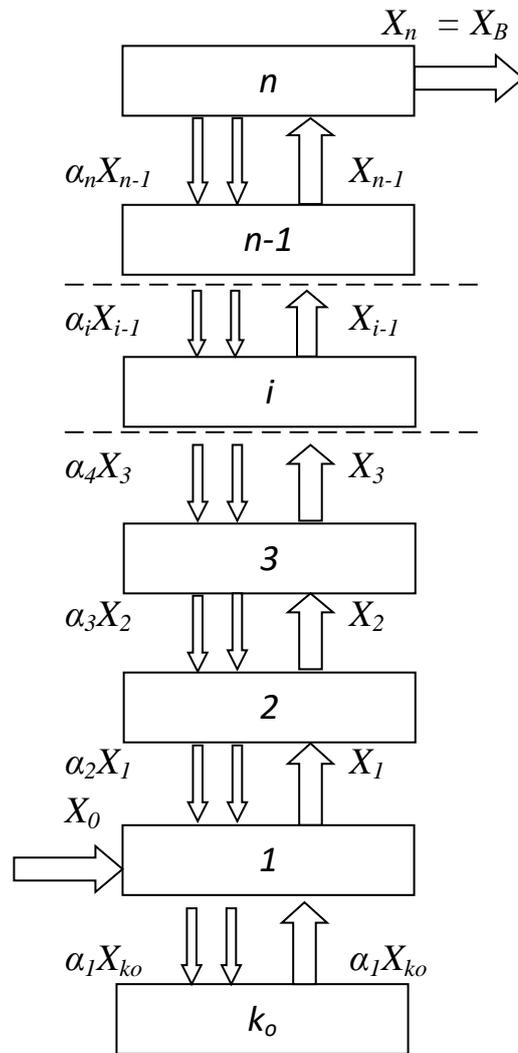


Рисунок 2.3 – Схема движения материальных потоков в подъемном винтовом смесителе

По аналогии составляем систему уравнений материального баланса:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 X_1 = X_0 + \alpha_2 X_1 + \alpha_1 X_{k_0} - \alpha_1 X_{k_0} \\
 X_2 = X_1 + \alpha_3 X_2 - \alpha_2 X_1 \\
 X_3 = X_2 + \alpha_4 X_3 - \alpha_3 X_2 \\
 \text{-----} \\
 X_i = X_{i-1} + \alpha_{i+1} X_i - \alpha_i X_{i-1} \\
 \text{-----} \\
 X_{n-1} = X_{n-2} + \alpha_n X_{n-1} - \alpha_{n-1} X_{n-2} \\
 X_n = X_{n-1} - \alpha_n X_{n-1} \\
 X_B = X_{n-1} - \alpha_n X_{n-1}
 \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Система, определяющая корреляционные функции n витков примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 Kx_1(\tau) = Kx_0(\tau) + \alpha_2^2 Kx_1(\tau) + \alpha_1^2 Kx_{ko}(\tau) - \alpha_1^2 Kx_{ko}(\tau) \\
 Kx_2(\tau) = Kx_1(\tau) + \alpha_3^2 Kx_2(\tau) - \alpha_2^2 Kx_1(\tau) \\
 Kx_3(\tau) = Kx_2(\tau) + \alpha_4^2 Kx_3(\tau) - \alpha_3^2 Kx_2(\tau) \\
 \hline
 Kx_i(\tau) = Kx_{i-1}(\tau) + \alpha_{i+1}^2 Kx_i(\tau) - \alpha_i^2 Kx_{i-1}(\tau) \\
 \hline
 Kx_{n-1}(\tau) = Kx_{n-2}(\tau) + \alpha_n^2 Kx_{n-1}(\tau) - \alpha_{n-1}^2 Kx_{n-2}(\tau) \\
 Kx_n(\tau) = Kx_{n-1}(\tau) - \alpha_n^2 Kx_{n-1}(\tau) \\
 Kx_B(\tau) = Kx_{n-1}(\tau) - \alpha_n^2 Kx_{n-1}(\tau)
 \end{array} \right. \quad (2.12)$$

Примем коэффициент «внутренней» рециркуляции равным между собой, (т.е. $\alpha_2 = \dots \alpha_n = \alpha$), тогда, решая полученную систему уравнений относительно $Kx_B(\tau)$ получим:

$$Kx_B(\tau) = Kx_0(\tau) \frac{(1-\alpha)^{n+4}}{(1-\alpha^2)^{n-1}} \quad (2.13)$$

При $\tau=0$ получается тождество $Kx_o = \sigma_{xo}^2$ и $Kx_B = \sigma_{xB}^2$. Известно, что степень сглаживания аппарата находится как соотношение дисперсий питающего σ_{xo}^2 и выходящего потоков σ_{xB}^2 . Определим из уравнений (2.4), (2.10) и (2.13) формулы определения сглаживающей способности, после чего воспользуемся программой MathCad для нахождения её значений на всем интервале варьирования коэффициентов рециркуляции (α , β) и опережения (γ).

Для схемы, представленной на рисунке 2.1. сглаживающая способность определяется:

$$S = \frac{(1-\alpha^2)^{n-1} - \beta^2(1-\alpha)^{2n-1}}{(1-\beta)^2(1-\alpha)^{2(n-1)}} \quad (2.14)$$

Проведем оценку диапазона изменения параметра S для рассматриваемой схемы. При коэффициентах «внутренней» $\alpha = 0 \dots 0,5$ и «внешней» $\beta = 0 \dots 0,5$ рециркуляции, S варьируется в интервале от 1 до 971. При этом большее влияние на сглаживание оказывает коэффициент «внутренней» рециркуляции (при $\alpha = 0 \dots 0,5$ и $\beta = 0$, $S = 1 \dots 324$; при $\alpha = 0$ и $\beta = 0 \dots 0,5$, $S = 1 \dots 4$).

Для схемы, представленной на рисунке 2.2, сглаживающая способность определяется:

$$S = \frac{((1-\alpha^2)^5 - (\gamma^2 + (1-\gamma))^{10} \cdot (1-\alpha)^{10} \cdot \beta^2)}{(\gamma^2 + (1-\gamma))^{10} \cdot (1-\alpha)^{10} \cdot (1-\beta)^2} \quad (2.15)$$

При следующих значениях коэффициентов рециркуляций и опережения α , $\beta = 0 \dots 0,5$, $\gamma = 0,05$, параметр S варьируется от 1,627 до 1580. А при $\gamma = 0,5$ $S = 16,70 \dots 16150$, при $\gamma = 0,6$ $S = 15,6 \dots 15119$.

Для схемы, представленной на рисунке 2.3, сглаживающая способность определяется:

$$S = \frac{(1-\alpha^2)^{n-1}}{(1-\alpha)^{n+4}} \quad (2.16)$$

При коэффициенте внутренней рециркуляции $\alpha = 0 \dots 0,5$ параметр S варьируется от 1 до 232. При $\alpha = 0,6 \dots 0,9$ $S = 1030 \dots 2480000$.

Проведя анализ полученных данных, мы выяснили, что вертикальные вибрационные СНД [100, 103, 105] обладают высокой инерционностью. При одинаковых значениях параметра S , второй смеситель может содержать меньшее количество витков рабочего органа a , соответственно, будет менее габаритен и металлоемок.

На основании приведенных уравнений можно сделать вывод, что при работе смесителя в непрерывном режиме следует принимать величины: коэффициента внутренней рециркуляции α в диапазоне от 0,3 до 0,7 ($0,3 \leq \alpha \leq 0,7$); коэффициента внешней рециркуляции $\beta=0$, так как при значениях $\alpha > 0,7$ и $\beta > 0$ наблюдается увеличение габаритов смесителя, а, следовательно, повышается и его металлоемкость.

2.2.1 Моделирование проточного смесительного агрегата вибрационного типа

Рассмотрим проточный смесительный агрегат (Патент 2613045), который работает следующим образом: через патрубок ввода ингредиенты поступают на верхний виток перфорированного лотка, затем перемещаясь вниз по лотку, они смешиваются и выводятся через расположенный на конце лотка патрубок вывода. Просев через перфорацию создает эффект опережения, что способствует сглаживанию неравномерностей расхода ингредиентов [106]. Схема движения материальных потоков приведена на рисунке 2.4.

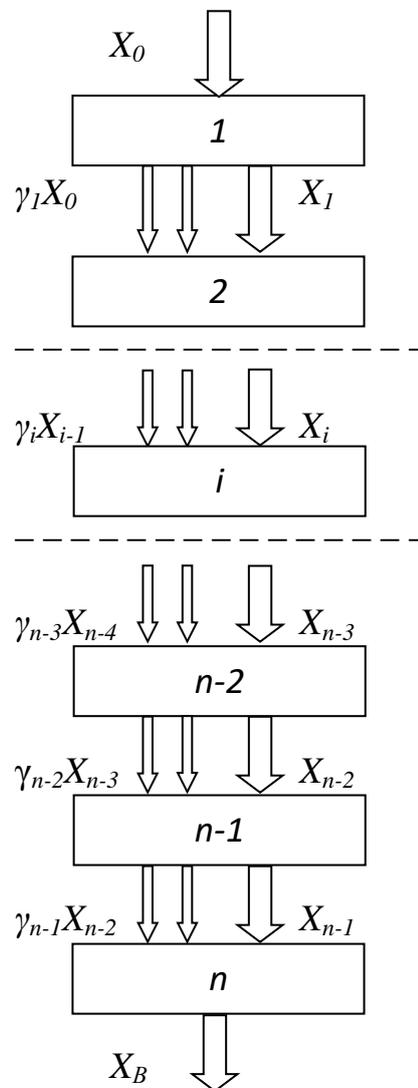


Рисунок 2.4 – Схема движения материальных потоков в проточном винтовом смесителе

По аналогии составляем систему уравнений материального баланса:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = X_0 - \gamma_1 X_0 \\ X_2 = X_1 + \gamma_1 X_0 - \gamma_2 X_1 \\ X_3 = X_2 + \gamma_2 X_1 - \gamma_3 X_2 \\ \text{-----} \\ X_i = X_{i-1} + \gamma_{i-1} X_{i-2} - \gamma_i X_{i-1} \\ \text{-----} \\ X_{n-2} = X_{n-3} + \gamma_{n-3} X_{n-4} - \gamma_{n-2} X_{n-3} \\ X_{n-1} = X_{n-2} + \gamma_{n-2} X_{n-3} - \gamma_{n-1} X_{n-2} \\ X_B = X_{n-1} - \gamma_{n-1} X_{n-2} \end{array} \right. \quad (2.17)$$

Система, определяющая корреляционные функции n витков примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Kx_1(\tau) = Kx_0(\tau) - \gamma_1^2 Kx_0(\tau) \\ Kx_2(\tau) = Kx_1(\tau) + \gamma_1^2 Kx_0(\tau) - \gamma_2^2 Kx_1(\tau) \\ Kx_3(\tau) = Kx_2(\tau) + \gamma_2^2 Kx_1(\tau) - \gamma_3^2 Kx_2(\tau) \\ \text{-----} \\ Kx_i(\tau) = Kx_{i-1}(\tau) + \gamma_{i-1}^2 Kx_{i-2}(\tau) - \gamma_i^2 Kx_{i-1}(\tau) \\ \text{-----} \\ Kx_{n-2}(\tau) = Kx_{n-3}(\tau) + \gamma_{n-3}^2 Kx_{n-4}(\tau) - \gamma_{n-2}^2 Kx_{n-3}(\tau) \\ Kx_{n-1}(\tau) = Kx_{n-2}(\tau) + \gamma_{n-2}^2 Kx_{n-3}(\tau) - \gamma_{n-1}^2 Kx_{n-2}(\tau) \\ Kx_B(\tau) = Kx_{n-1}(\tau) - \gamma_{n-1}^2 Kx_{n-2}(\tau) \end{array} \right. \quad (2.18)$$

Примем коэффициент опережения равным между собой, (т.е. $\gamma_3 = \dots \gamma_n = \gamma$), тогда, решая систему уравнений (2.18) относительно $Kx_e(\tau)$ получим следующее выражение:

$$Kx_B(\tau) = Kx_0(\tau) \left[(1-\gamma)^{2(n-1)} + (n-2)\gamma^2(1-\gamma)^{2(n-3)} + \gamma^2(1-\gamma)^{2(n-2)} + \gamma^n + \left(\frac{3n-12}{2}\right)\gamma^4(1-\gamma)^{(n-4)} + \left(\frac{3n-12}{2}\right)\gamma^4(1-\gamma)^{(n-2)} \right] \quad (2.19)$$

Для схемы (рисунок 2.4) сглаживающая способность равна:

$$S = \frac{1}{(1-\gamma)^{2(n-1)} + (n-2)\gamma^2(1-\gamma)^{2(n-3)} + \gamma^2(1-\gamma)^{2(n-2)} + \gamma^n + \left(\frac{3n-12}{2}\right)\gamma^4(1-\gamma)^{(n-4)} + \left(\frac{3n-12}{2}\right)\gamma^4(1-\gamma)^{(n-2)}} \quad (2.20)$$

Оценим диапазон изменения параметра S . При коэффициенте опережения $\gamma = 0 \dots 0,5$ степень сглаживания S изменяется в интервале от 1 до 4,6.

Проанализировав полученные данные, мы увидели, что прямоточный вертикальный вибрационный смеситель [106], по сравнению с подъемными [100, 103, 105] вертикальными смесителями имеет меньшую сглаживающую способность, что потребует более высокой равномерности дозируемых потоков.

2.3 Корреляционный анализ вибросмесителя с рецикл каналом, реализующего метод «последовательного разбавления»

Далее рассмотрим схемы, реализующие метод «последовательного разбавления» [104].

На первой схеме, представленной на рисунке 2.5, реализовано одноступенчатое последовательное разбавление, согласно которой массовый расход фонового компонента делится на 2 части. Примем, что первая часть со всем количеством трассера подается на первый виток, а вторая – на третий виток перфорированного дополнительного рабочего органа. Под действием вибрации смесь перемещается под уклон и одновременно осуществляется процесс смешения. Часть смеси просеивается через перфорацию на лежащие ниже витки, тем самым опережая основной материалопоток. После достижения дна дополнительного рабочего органа материал направляется на нижний виток основного рабочего органа. Так как он ничем не отличается от представленного в разделе 2.2, то при расчетах рассмотрим лишь вставку с дополнительным рабочим органом.

Рассчитать систему уравнений для неопределенного количества витков невозможно, поэтому примем $m=6$, тогда уравнение материального баланса будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho X_0 = X_1 + \gamma_1 \rho X_0 \\ X_1 + \gamma_1 \rho X_0 = X_2 + \gamma_2 X_1 \\ X_2 + \gamma_2 X_1 + (1-\rho)X_0 = X_3 + \gamma_3 X_2 + \gamma_3 (1-\rho)X_0 \\ X_3 + \gamma_3 X_2 + \gamma_3 (1-\rho)X_0 = X_4 + \gamma_4 X_3 \\ X_4 + \gamma_4 X_3 = X_5 + \gamma_5 X_4 \\ X_5 + \gamma_5 X_4 = X_6 \\ X_B = X_6 \end{array} \right. \quad (2.21)$$

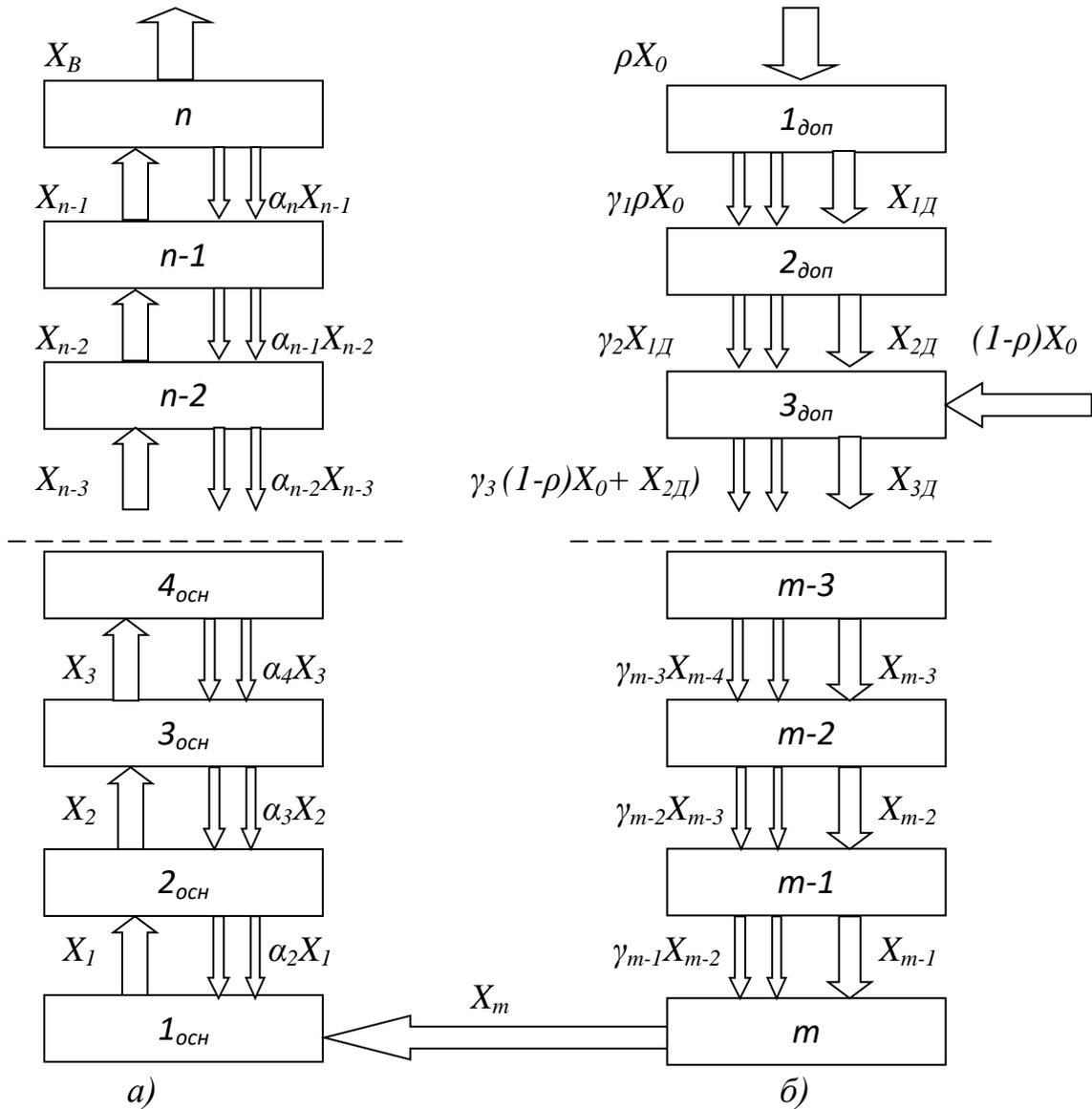


Рисунок 2.5 - Схема одноступенчатого «последовательного разбавления»
 а) основной рабочий орган; б) дополнительный рабочий орган

Выразив из уравнения $X_j(t)$ получим следующую систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1(t) = (1 - \gamma_1)\rho X_0(t) \\ X_2(t) = \gamma_1\rho X_0(t) + (1 - \gamma_2) X_1(t) \\ X_3(t) = \gamma_2 X_1(t) + (1 - \gamma_3)X_2(t) + (1 - \gamma_3)(1 - \rho)X_0(t) \\ X_4(t) = \gamma_3 X_2(t) + (1 - \gamma_4)X_3(t) + \gamma_3(1 - \rho)X_0(t) \\ X_5(t) = \gamma_4 X_3(t) + (1 - \gamma_5)X_4(t) \\ X_6(t) = \gamma_5 X_4(t) + X_5(t) \\ X_B(t) = X_6(t) \end{array} \right. \quad (2.22)$$

Для установления влияния рециркуляции на инерционные свойства смесителя применим корреляционный подход. Предположим, что $Kx_i x_j = 0$ при $i \neq j$, т.е. отсутствует взаимная корреляция потоков. Исходя из этого, получим систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} Kx_1 = (1 - \gamma_1)^2 \rho^2 Kx_0 \\ Kx_2 = (1 - \gamma_2)^2 Kx_1 + \gamma_1^2 \rho^2 Kx_0 \\ Kx_3 = (1 - \gamma_3)^2 Kx_2 + \gamma_2^2 Kx_1 + (1 - \gamma_3)^2 (1 - \rho)^2 Kx_0 \\ Kx_4 = (1 - \gamma_4)^2 Kx_3 + \gamma_3^2 Kx_2 + \gamma_3^2 (1 - \rho)^2 Kx_0 \\ Kx_5 = (1 - \gamma_5)^2 Kx_4 + \gamma_4^2 Kx_3 \\ Kx_6 = \gamma_5^2 Kx_4 + Kx_5 \\ Kx_B = Kx_6 \end{array} \right. \quad (2.23)$$

Решая систему (2.23) и выражая Kx_0 , получим:

$$\begin{aligned} Kx_B = Kx_0 [& (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 \gamma_1^2 \gamma_5^2 \rho^2 + \\ & + (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_2^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \rho)^2 \gamma_5^2 + (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_3^2 \gamma_5^2 \rho^2 + \\ & + \gamma_1^2 \gamma_3^2 \gamma_5^2 \rho^2 + \gamma_3^2 \gamma_5^2 (1 - \rho)^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \\ & - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 \gamma_1^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_2^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \rho)^2 + \\ & + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_3^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 \gamma_3^2 \gamma_1^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \rho)^2 \gamma_3^2 + (1 - \gamma_3)^2 (1 - \\ & - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_4^2 \rho^2 + (1 - \gamma_3)^2 \gamma_4^2 \gamma_1^2 \rho^2 + (1 - \gamma_1)^2 \gamma_4^2 \gamma_2^2 \rho^2 + (1 - \gamma_3)^2 (1 - \rho)^2 \gamma_4^2] \end{aligned} \quad (2.24)$$

Преобразуем выражение (2.24), учитывая, что $Kx_0 = \sigma_{x_0}^2$ и $Kx_6 = \sigma_{x_6}^2$ получим уравнение:

$$\begin{aligned} \sigma_{x_6}^2 = \sigma_{x_0}^2 [& (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 \gamma_1^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (1 - \\ & - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_2^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \rho)^2 \gamma_5^2 + (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_3^2 \gamma_5^2 \rho^2 + \\ & + \gamma_1^2 \gamma_3^2 \gamma_5^2 \rho^2 + \gamma_3^2 \gamma_5^2 (1 - \rho)^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \\ & - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 \gamma_1^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_2^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \rho)^2 + \\ & + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_3^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 \gamma_3^2 \gamma_1^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \rho)^2 \gamma_3^2 + (1 - \gamma_3)^2 (1 - \\ & - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_4^2 \rho^2 + (1 - \gamma_3)^2 \gamma_4^2 \gamma_1^2 \rho^2 + (1 - \gamma_1)^2 \gamma_4^2 \gamma_2^2 \rho^2 + (1 - \gamma_3)^2 (1 - \rho)^2 \gamma_4^2] \end{aligned} \quad (2.25)$$

Сглаживающая способность дополнительного рабочего органа зависит от величины коэффициента рециркуляции γ и коэффициента разделения ρ и описывается следующим уравнением:

$$S = \sigma_{xo}^2 / \sigma_{xb}^2 = [(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2(1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_5^2\rho^2 + (1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2\gamma_1^2\gamma_5^2\rho^2 + (1-\gamma_4)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_2^2\gamma_5^2\rho^2 + (1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2(1-\rho)^2\gamma_5^2 + (1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_3^2\gamma_5^2\rho^2 + \gamma_1^2\gamma_3^2\gamma_5^2\rho^2 + \gamma_3^2\gamma_5^2(1-\rho)^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2(1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)^2\rho^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2\gamma_1^2\rho^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_2^2\rho^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2(1-\rho)^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_3^2\rho^2 + (1-\gamma_5)^2\gamma_3^2\gamma_1^2\rho^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\rho)^2\gamma_3^2 + (1-\gamma_3)^2(1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_4^2\rho^2 + (1-\gamma_3)^2\gamma_4^2\gamma_1^2\rho^2 + (1-\gamma_1)^2\gamma_4^2\gamma_2^2\rho^2 + (1-\gamma_3)^2(1-\rho)^2\gamma_4^2]^{-1} \quad (2.26)$$

Часть значений зависимости степени сглаживания от коэффициентов опережения γ и разделения ρ представлены в таблице 2.1.

Было предположено, что для узких витков необходим меньший коэффициент опережения, однако при расчетах это не подтвердилось, поэтому в дальнейшем будем принимать $\gamma_i = \gamma$. Из таблицы видно, что наибольшая степень сглаживания достигается при коэффициентах опережения $\gamma = 0,35$ и разделения $\rho = 0,6$.

Таблица 2.1 - Значения параметра S (γ, ρ)

$\rho\gamma$	0,250	0,300	0,350	0,400	0,450
0,450	8,93	10,18	10,89	11,07	10,82
0,500	9,56	10,85	11,53	11,65	11,34
0,550	10,06	11,37	11,99	12,04	11,67
0,600	10,39	11,68	12,24	12,20	11,76
0,650	10,50	11,75	12,22	12,10	11,61
0,700	10,39	11,57	11,96	11,77	11,24
0,750	10,06	11,16	11,47	11,23	10,69

На рисунке 2.6 представлена схема одноступенчатого разбавления потока, отличающаяся от предыдущей схемы тем, что вторая часть фонового компонента подается на второй виток перфорированного дополнительного рабочего органа.

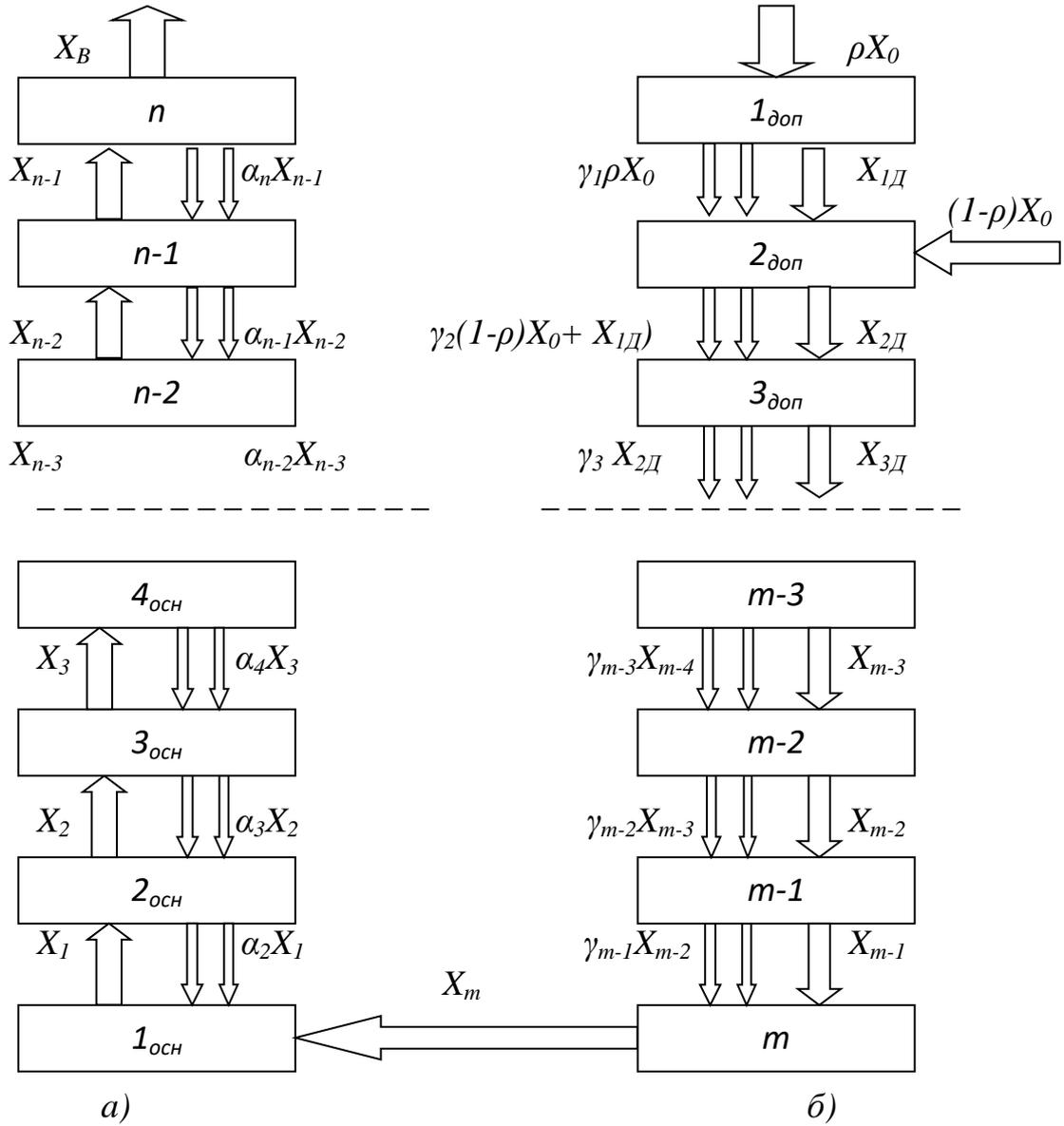


Рисунок 2.6 - Схема одноступенчатого «последовательного разбавления»

а) основной рабочий орган; б) дополнительный рабочий орган

Для $m=6$ система уравнений материального баланса, описывающая схему, изображенную на рисунке 2.6, будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho X_0 = X_1 + \gamma_1 \rho X_0 \\ X_1 + \gamma_1 \rho X_0 + (1-\rho)X_0 = X_2 + \gamma_2 X_1 + \gamma_2(1-\rho)X_0 \\ X_2 + \gamma_2 X_1 + \gamma_2(1-\rho)X_0 = X_3 + \gamma_3 X_2 \\ X_3 + \gamma_3 X_2 + \gamma_3(1-\rho)X_0 = X_4 + \gamma_4 X_3 \\ X_4 + \gamma_4 X_3 = X_5 + \gamma_5 X_4 \\ X_5 + \gamma_5 X_4 = X_6 \\ X_B = X_6 \end{array} \right. \quad (2.27)$$

Выразив из уравнения $X_j(t)$ получим следующую систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1(t) = (1 - \gamma_1)\rho X_0(t) \\ X_2(t) = \gamma_1\rho X_0(t) + (1 - \rho)X_0(t) + \gamma_2(1 - \rho)X_0(t) + (1 - \gamma_2)X_1(t) \\ X_3(t) = \gamma_2 X_1(t) + (1 - \gamma_3)X_2(t) + \gamma_2(1 - \rho)X_0(t) \\ X_4(t) = \gamma_3 X_2(t) + (1 - \gamma_4)X_3(t) \\ X_5(t) = \gamma_4 X_3(t) + (1 - \gamma_5)X_4(t) \\ X_6(t) = \gamma_5 X_4(t) + X_5(t) \\ X_B(t) = X_6(t) \end{array} \right. \quad (2.28)$$

Снова применим корреляционный подход для установления влияния рециркуляции на инерционные свойства смесителя ($Kx_i x_j = 0$, при $i \neq j$). Исходя из этого, получим систему, которая определяет корреляционные функции витков дополнительного рабочего органа, следующего вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} Kx_1 = (1 - \gamma_1)^2 \rho^2 Kx_0 \\ Kx_2 = \gamma_1^2 \rho^2 Kx_0 + (1 - \rho)^2 Kx_0 + \gamma_2^2 (1 - \rho)^2 Kx_0 + (1 - \gamma_2)^2 Kx_1 \\ Kx_3 = \gamma_2^2 Kx_1 + (1 - \gamma_3)^2 Kx_2 + \gamma_2^2 (1 - \rho)^2 Kx_0 \\ Kx_4 = (1 - \gamma_4)^2 Kx_3 + \gamma_3^2 Kx_2 \\ Kx_5 = (1 - \gamma_5)^2 Kx_4 + \gamma_4^2 Kx_3 \\ Kx_6 = \gamma_5^2 Kx_4 + Kx_5 \\ Kx_B = Kx_6 \end{array} \right. \quad (2.29)$$

Решая систему (2.29) и выражая Kx_0 , получим:

$$\begin{aligned} Kx_B = Kx_0 [& (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 \gamma_1^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \rho)^2 \gamma_5^2 + (1 - \gamma_4)^2 (1 - \\ & - \gamma_3)^2 \gamma_2^2 \gamma_5^2 (1 - \rho)^2 + (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_2^2 \gamma_5^2 \rho^2 + \\ & + (1 - \gamma_4)^2 (1 - \rho)^2 \gamma_2^2 \gamma_5^2 + \gamma_5^2 \gamma_3^2 \gamma_1^2 \rho^2 + (1 - \rho)^2 \gamma_5^2 \gamma_3^2 + \gamma_5^2 \gamma_3^2 \gamma_2^2 (1 - \rho)^2 + (1 - \gamma_2)^2 (1 - \\ & - \gamma_1)^2 \gamma_5^2 \gamma_3^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 \gamma_1^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \rho)^2 + (1 - \\ & - \gamma_5)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 \gamma_2^2 (1 - \rho)^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1) \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \\ & - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_2^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \rho)^2 \gamma_2^2 + (1 - \gamma_5)^2 \gamma_3^2 \gamma_1^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \\ & - \rho)^2 \gamma_3^2 + (1 - \gamma_5)^2 \gamma_3^2 \gamma_2^2 (1 - \rho)^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_3^2 \rho^2 + (1 - \gamma_3)^2 \gamma_4^2 \gamma_1^2 \rho^2 + (1 - \\ & - \gamma_3)^2 (1 - \rho)^2 \gamma_4^2 + (1 - \gamma_3)^2 \gamma_4^2 \gamma_2^2 (1 - \rho)^2 + (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_4^2 \rho^2 + \\ & + (1 - \gamma_1)^2 \gamma_4^2 \gamma_2^2 \rho^2 + (1 - \rho)^2 \gamma_4^2 \gamma_2^2] \end{aligned} \quad (2.30)$$

Преобразуя выражение (2.30) получим:

$$\sigma_{x_8}^2 = \sigma_{x_0}^2 [(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2\gamma_1^2\gamma_5^2\rho^2 + (1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2(1-\rho)^2\gamma_5^2 + (1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2\gamma_2^2\gamma_5^2(1-\rho)^2 + (1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2(1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_5^2\rho^2 + (1-\gamma_4)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_2^2\gamma_5^2\rho^2 + (1-\gamma_4)^2(1-\rho)^2\gamma_2^2\gamma_5^2 + \gamma_5^2\gamma_3^2\gamma_1^2\rho^2 + (1-\rho)^2\gamma_5^2\gamma_3^2 + \gamma_5^2\gamma_3^2\gamma_2^2(1-\rho)^2 + (1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_5^2\gamma_3^2\rho^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2\gamma_1^2\rho^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2(1-\rho)^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2\gamma_2^2(1-\rho)^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2(1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)\rho^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_2^2\rho^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\rho)^2\gamma_2^2 + (1-\gamma_5)^2\gamma_3^2\gamma_1^2\rho^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\rho)^2\gamma_3^2 + (1-\gamma_5)^2\gamma_3^2\gamma_2^2(1-\rho)^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_3^2\rho^2 + (1-\gamma_3)^2\gamma_4^2\gamma_1^2\rho^2 + (1-\gamma_3)^2(1-\rho)^2\gamma_4^2 + (1-\gamma_3)^2\gamma_4^2\gamma_2^2(1-\rho)^2 + (1-\gamma_3)^2(1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_4^2\rho^2 + (1-\gamma_1)^2\gamma_4^2\gamma_2^2\rho^2 + (1-\rho)^2\gamma_4^2\gamma_2^2]$$

Таким образом, сглаживание дополнительного рабочего органа, описывается уравнением (2.32).

$$S = \sigma_{x_0}^2 / \sigma_{x_8}^2 = [(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2\gamma_1^2\gamma_5^2\rho^2 + (1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2(1-\rho)^2\gamma_5^2 + (1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2\gamma_2^2\gamma_5^2(1-\rho)^2 + (1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2(1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_5^2\rho^2 + (1-\gamma_4)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_2^2\gamma_5^2\rho^2 + (1-\gamma_4)^2(1-\rho)^2\gamma_2^2\gamma_5^2 + \gamma_5^2\gamma_3^2\gamma_1^2\rho^2 + (1-\rho)^2\gamma_5^2\gamma_3^2 + \gamma_5^2\gamma_3^2\gamma_2^2(1-\rho)^2 + (1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_5^2\gamma_3^2\rho^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2\gamma_1^2\rho^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2(1-\rho)^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2\gamma_2^2(1-\rho)^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_3)^2(1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)\rho^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_2^2\rho^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_4)^2(1-\rho)^2\gamma_2^2 + (1-\gamma_5)^2\gamma_3^2\gamma_1^2\rho^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\rho)^2\gamma_3^2 + (1-\gamma_5)^2\gamma_3^2\gamma_2^2(1-\rho)^2 + (1-\gamma_5)^2(1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_3^2\rho^2 + (1-\gamma_3)^2\gamma_4^2\gamma_1^2\rho^2 + (1-\gamma_3)^2(1-\rho)^2\gamma_4^2 + (1-\gamma_3)^2\gamma_4^2\gamma_2^2(1-\rho)^2 + (1-\gamma_3)^2(1-\gamma_2)^2(1-\gamma_1)^2\gamma_4^2\rho^2 + (1-\gamma_1)^2\gamma_4^2\gamma_2^2\rho^2 + (1-\rho)^2\gamma_4^2\gamma_2^2]^{-1}$$

Часть значений расчета степени сглаживания S в зависимости от коэффициентов γ и ρ приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Значения параметра S (γ, ρ)

$\rho \backslash \gamma$	0,300	0,350	0,400	0,450	0,500
0,650	13,26	14,26	14,22	13,34	11,94
0,700	13,83	15,05	15,13	14,28	12,82
0,750	14,05	15,47	15,69	14,88	13,41
0,800	13,90	15,46	15,81	15,07	13,62
0,850	13,40	15,03	15,46	14,80	13,41
0,900	12,62	14,23	14,71	14,12	12,82
0,950	11,66	13,19	13,66	13,14	11,94

В результате расчетов так же было установлено, что оптимальный коэффициент опережения составляет $\gamma = 0,4$, а разделения $\rho = 0,8$.

Если сравнить результаты таблицы 2.1. и таблицы 2.2 то можно увидеть, что наибольшей степени сглаживания можно достичь при подаче на первый и второй витки фонового компонента.

На схеме, представленной на рисунке 2.7, реализовано двухступенчатое разбавление. Массовый расход фонового компонента делится на три части. Первая часть, так же как и в предыдущих схемах со всем количеством трассера подается на первый, вторая часть на второй, а третья – на третий витки перфорированного дополнительного рабочего органа.

В связи с тем, что основной рабочий орган ничем не отличается от представленного в разделе 2.2, то рассмотрим лишь движение материала по дополнительному рабочему органу.

Уравнения материального баланса представлены следующей системой:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho X_0 = X_1 + \gamma_1 \rho X_0 \\ X_1 + \gamma_1 \rho X_0 = X_2 + \gamma_2 X_1 + \gamma_2 \delta X_1 \\ X_2 + \gamma_2 X_1 + \gamma_2 \delta X_1 = X_3 + \gamma_3 X_2 + \gamma_3 (1 - \rho - \delta) X_0 \\ X_3 + \gamma_3 X_2 + \gamma_3 (1 - \rho - \delta) X_0 = X_4 + \gamma_4 X_3 \\ X_4 + \gamma_4 X_3 = X_5 + \gamma_5 X_4 \\ X_5 + \gamma_5 X_4 = X_6 \\ X_B = X_6 \end{array} \right. \quad (2.33)$$

Выразив из уравнения $X_j(t)$ получим следующую систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1(t) = \rho(1 - \gamma_1)X_0(t) \\ X_2(t) = (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)X_0(t) + (1 - \gamma_2)X_1(t) \\ X_3(t) = \gamma_2 X_1(t) + (1 - \gamma_3)X_2(t) + (\gamma_2 \delta - \gamma_3(1 - \rho - \delta))X_0(t) \\ X_4(t) = \gamma_3 X_2(t) + (1 - \gamma_4)X_3(t) + \gamma_3(1 - \rho - \delta)X_0(t) \\ X_5(t) = \gamma_4 X_3(t) + (1 - \gamma_5)X_4(t) \\ X_6(t) = \gamma_5 X_4(t) + X_5(t) \\ X_B(t) = X_6(t) \end{array} \right. \quad (2.34)$$

Система, определяющая корреляционные функции витков дополнительного рабочего органа примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Kx_1 = (1 - \gamma_1)^2 \rho^2 Kx_0 \\ Kx_2 = (1 - \gamma_2)^2 Kx_1 + (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 Kx_0 \\ Kx_3 = (1 - \gamma_3)^2 Kx_2 + \gamma_2^2 Kx_1 + (\gamma_2 \delta - \gamma_3 (1 - \rho - \delta))^2 Kx_0 \\ Kx_4 = (1 - \gamma_4)^2 Kx_3 + \gamma_3^2 Kx_2 + \gamma_3^2 (1 - \rho - \delta)^2 Kx_0 \\ Kx_5 = (1 - \gamma_5)^2 Kx_4 + \gamma_4^2 Kx_3 \\ Kx_6 = \gamma_5^2 Kx_4 + Kx_5 \\ Kx_B = Kx_6 \end{array} \right. \quad (2.35)$$

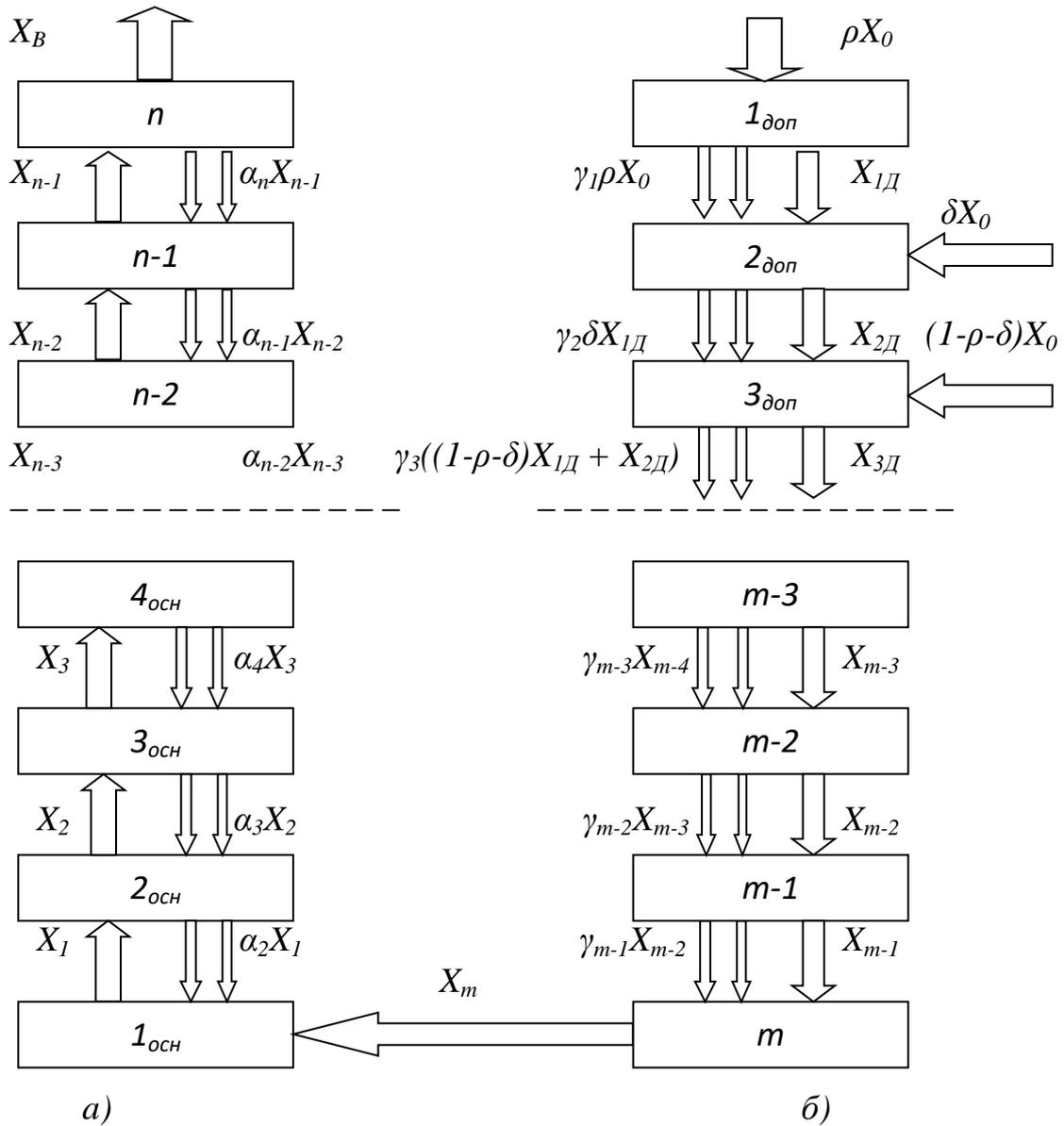


Рисунок 2.7 - Схема двухступенчатого «последовательного разбавления»

а) основной рабочий орган; б) дополнительный рабочий орган

Решая методом подстановки и выражая Kx_0 получим:

$$Kx_B = Kx_0 [(1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_4^2 \rho^2 + (1 - \gamma_3)^2 (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 \gamma_4^2 + (1 - \gamma_1)^2 \gamma_4^2 \gamma_2^2 \rho^2 + (\gamma_2 \delta - \gamma_3 (1 - \rho - \delta))^2 \gamma_4^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_4)^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_4)^2 (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 \gamma_5^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_4)^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (1 - \gamma_4)^2 (\gamma_2 \delta - \gamma_3 (1 - \rho - \delta))^2 \gamma_5^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 -$$

$$\begin{aligned}
& -\gamma_2)^2 \gamma_3^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 \cdot \gamma_3^2 \gamma_5^2 + (1 - \rho - \delta)^2 \gamma_3^2 \gamma_5^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_5)^2 \rho^2 + (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_5)^2 \cdot (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_5)^2 \gamma_2^2 \rho^2 + (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_5)^2 (\gamma_2 \delta - \gamma_3 (1 - \rho - \delta))^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_2)^2 \cdot (1 - \gamma_5)^2 \gamma_3^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 \gamma_3^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \rho - \delta)^2 \gamma_3^2] \quad (2.36)
\end{aligned}$$

Преобразуя выражение (2.36) в результате получим:

$$\begin{aligned}
\sigma_{x_6}^2 = \sigma_{x_0}^2 [& (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_4^2 \rho^2 + (1 - \gamma_3)^2 (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 \gamma_4^2 + (1 - \gamma_1)^2 \gamma_4^2 \gamma_2^2 \rho^2 + (\gamma_2 \delta - \gamma_3 (1 - \rho - \delta))^2 \gamma_4^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_4)^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_4)^2 (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 \gamma_5^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_4)^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (1 - \gamma_4)^2 (\gamma_2 \delta - \gamma_3 (1 - \rho - \delta))^2 \gamma_5^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_2)^2 \gamma_3^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 \cdot \gamma_3^2 \gamma_5^2 + (1 - \rho - \delta)^2 \gamma_3^2 \gamma_5^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_5)^2 \rho^2 + (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_5)^2 \cdot (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_5)^2 \gamma_2^2 \rho^2 + (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_5)^2 (\gamma_2 \delta - \gamma_3 (1 - \rho - \delta))^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_2)^2 \cdot (1 - \gamma_5)^2 \gamma_3^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 \gamma_3^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \rho - \delta)^2 \gamma_3^2] \quad (2.37)
\end{aligned}$$

Значение степени сглаживания дополнительного рабочего органа, которое зависит от величины коэффициента рециркуляции γ и коэффициентов разделения δ , ρ и описывается уравнением:

$$\begin{aligned}
S = \sigma_{x_0}^2 / \sigma_{x_6}^2 = [& (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_1)^2 \gamma_4^2 \rho^2 + (1 - \gamma_3)^2 (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 \gamma_4^2 + (1 - \gamma_1)^2 \gamma_4^2 \gamma_2^2 \rho^2 + (\gamma_2 \delta - \gamma_3 (1 - \rho - \delta))^2 \gamma_4^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_4)^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_4)^2 (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 \gamma_5^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_4)^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (1 - \gamma_4)^2 (\gamma_2 \delta - \gamma_3 (1 - \rho - \delta))^2 \gamma_5^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_2)^2 \gamma_3^2 \gamma_5^2 \rho^2 + (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 \cdot \gamma_3^2 \gamma_5^2 + (1 - \rho - \delta)^2 \gamma_3^2 \gamma_5^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_2)^2 (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_5)^2 \rho^2 + (1 - \gamma_3)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_5)^2 \cdot (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_5)^2 \gamma_2^2 \rho^2 + (1 - \gamma_4)^2 (1 - \gamma_5)^2 (\gamma_2 \delta - \gamma_3 (1 - \rho - \delta))^2 + (1 - \gamma_1)^2 (1 - \gamma_2)^2 \cdot (1 - \gamma_5)^2 \gamma_3^2 \rho^2 + (1 - \gamma_5)^2 (\gamma_1 \rho - \gamma_2 \delta)^2 \gamma_3^2 + (1 - \gamma_5)^2 (1 - \rho - \delta)^2 \gamma_3^2]^{-1} \quad (2.38)
\end{aligned}$$

Зависимость степени сглаживания от коэффициентов разделения δ и ρ , при коэффициенте опережения $\gamma=0,4$ представлена в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Значения параметра S (δ , ρ)

$\delta \backslash \rho$	0,300	0,350	0,400	0,450	0,500
0,200	15,94	19,31	23,19	27,16	30,45
0,250	22,23	27,59	33,49	38,75	41,52
0,300	31,17	39,04	46,56	50,82	49,48
0,350	41,52	50,34	55,61	54,24	47,11
0,400	47,70	52,62	51,51	45,28	36,86
0,450	43,97	43,42	38,97	32,66	26,37

В результате расчетов было установлено, что наибольшая степень сглаживания достигается при $\gamma=0,4$ $\delta=0,35$ и $\rho=0,4$.

Рассмотрим вибросмеситель с рецикл каналом, осуществляющий метод «последовательного разбавления» [107]. В данном случае массовый расход фонового компонента делится на три части: 1-ая часть, вместе с ключевым компонентом, подается на лоток дополнительного рабочего органа смесителя; подача 2-й и 3-й частей осуществляется на второй (X_{01}) и третий (X_{02}) витки основного рабочего органа. Благодаря перфорации основного рабочего органа создается рецикл канал, который осуществляет возврат некоторой части компонентов на нижележащие витки. Схема движения потоков компонентов смеси представлена на рисунке 2.8.

Так как дополнительный рабочий орган был рассмотрен ранее в разделе 2.2, то рассмотрим только основной рабочий орган с $n = 6$. Должно осуществляться требование $X_0 = X_{01} + X_{02}$, примем в равных количествах $X_{01} = \frac{1}{2}X_0$, $X_{02} = \frac{1}{2}X_0$.

Тогда система уравнений материального баланса примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = \frac{1}{2}X_0 + \alpha_2 X_1 \\ X_2 = X_1 + \alpha_3 X_2 + \alpha_1 \frac{1}{2}X_0 - \alpha_2 X_1 \\ X_3 = X_2 + \frac{1}{2}X_0 + \alpha_4 X_3 - \alpha_3 X_2 - \alpha_1 \frac{1}{2}X_0 \\ X_4 = X_3 + \alpha_5 X_4 - \alpha_4 X_3 \\ X_5 = X_4 + \alpha_6 X_5 - \alpha_5 X_4 \\ X_6 = X_5 - \alpha_6 X_5 \\ X_B = X_5 - \alpha_6 X_5 \end{array} \right. \quad (2.39)$$

Система, определяющая корреляционные функции n витков примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Kx_1 = \frac{1}{2}Kx_0 + \alpha_2^2 Kx_1 \\ Kx_2 = Kx_1 + \alpha_3^2 Kx_2 + \alpha_1^2 \frac{1}{2}Kx_0 - \alpha_2^2 Kx_1 \\ Kx_3 = Kx_2 + \frac{1}{2}Kx_0 + \alpha_4^2 Kx_3 - \alpha_3^2 Kx_2 - \alpha_1^2 \frac{1}{2}Kx_0 \\ Kx_4 = Kx_3 + \alpha_5^2 Kx_4 - \alpha_4^2 Kx_3 \\ Kx_5 = Kx_4 + \alpha_6^2 Kx_5 - \alpha_5^2 Kx_4 \\ Kx_6 = Kx_5 - \alpha_6^2 Kx_5 \\ Kx_B = Kx_5 - \alpha_6^2 Kx_5 \end{array} \right. \quad (2.40)$$

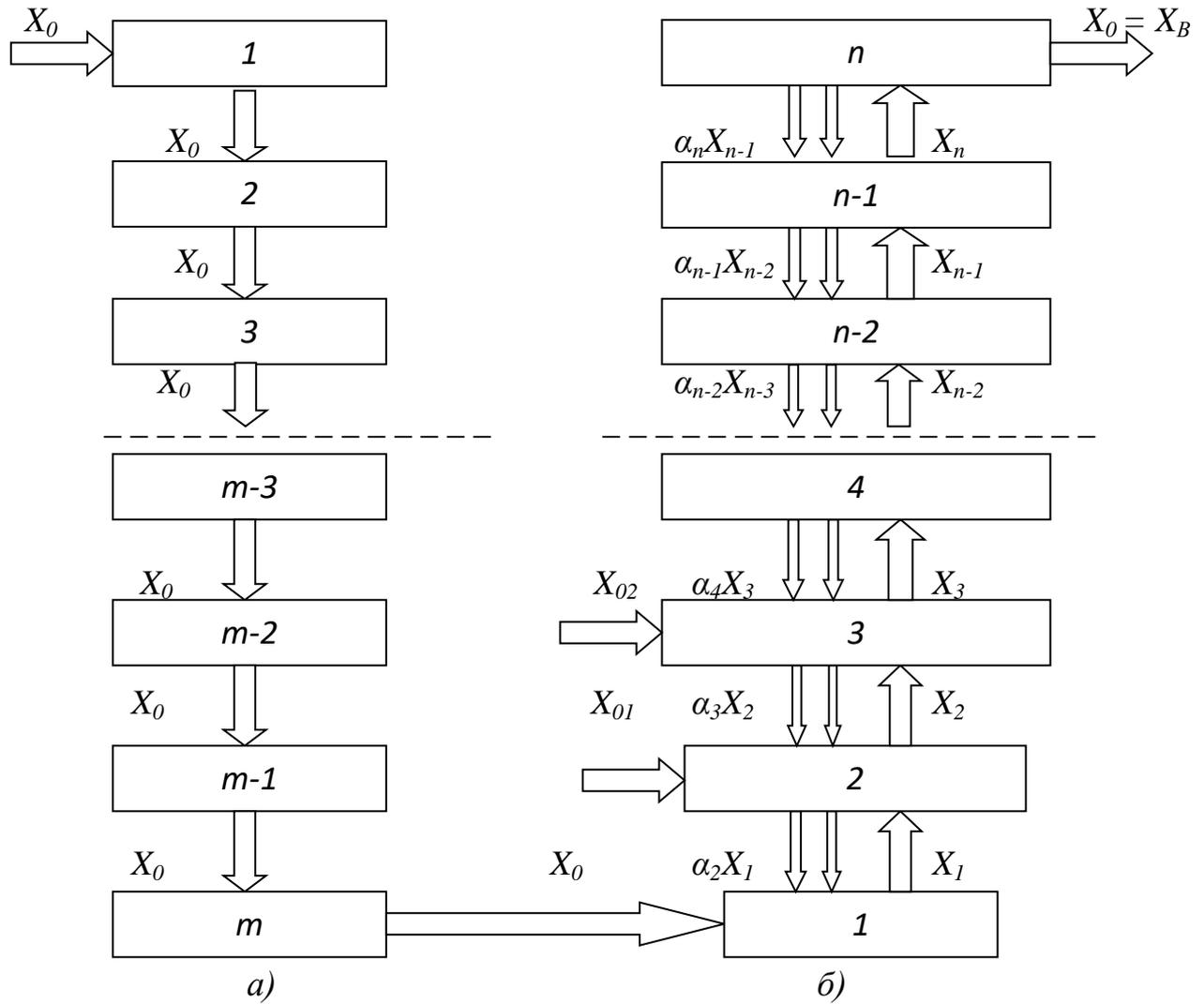


Рисунок 2.8 – Схема движения материальных потоков в вибросмесителе с рецикл каналом, реализующем метод «последовательного разбавления»
 а) дополнительный рабочий орган; б) основной рабочий орган

Решая методом подстановки и выражая Kx_0 получим:

$$Kx_B = Kx_0 \left[\frac{(1-\alpha_6)(1-\alpha_5)(1-\alpha_4)(1-\alpha_3)(1-\alpha_2) + \alpha_1^2(1-\alpha_6)(1-\alpha_5) \cdot (1-\alpha_4)(1-\alpha_3)(1+\alpha_2) + (1-\alpha_6)(1-\alpha_5)(1-\alpha_4)(1-\alpha_1)^2 \cdot (1+\alpha_3)(1+\alpha_2)}{2(1+\alpha_6)(1+\alpha_5)(1+\alpha_4)(1+\alpha_3)(1+\alpha_2)} \right] \quad (2.41)$$

Преобразуя выражение (2.41) в результате получим:

$$\sigma_{x_{\text{В}}}^2 = \sigma_{x_0}^2 \left[\frac{(1-\alpha_6)(1-\alpha_5)(1-\alpha_4)(1-\alpha_3)(1-\alpha_2) + \alpha_1^2(1-\alpha_6)(1-\alpha_5) \cdot (1-\alpha_4)(1-\alpha_3)(1+\alpha_2) + (1-\alpha_6)(1-\alpha_5)(1-\alpha_4)(1-\alpha_1)^2 \cdot (1+\alpha_3)(1+\alpha_2)}{2(1+\alpha_6)(1+\alpha_5)(1+\alpha_4)(1+\alpha_3)(1+\alpha_2)} \right] \quad (2.42)$$

Значение степени сглаживания основного рабочего органа описывается уравнением:

$$S = \frac{\sigma_{x_0}^2}{\sigma_{x_{\text{В}}}^2} = \left[\frac{2(1+\alpha_6)(1+\alpha_5)(1+\alpha_4)(1+\alpha_3)(1+\alpha_2)}{(1-\alpha_6)(1-\alpha_5)(1-\alpha_4)(1-\alpha_3)(1-\alpha_2) + \alpha_1^2(1-\alpha_6)(1-\alpha_5) \cdot (1-\alpha_4)(1-\alpha_3)(1+\alpha_2) + (1-\alpha_6)(1-\alpha_5)(1-\alpha_4)(1-\alpha_1)^2 \cdot (1+\alpha_3)(1+\alpha_2)} \right] \quad (2.43)$$

Значения параметра S , который зависит от значений коэффициента «внутренней» рециркуляции α и количества витков n представлена в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Значения параметра $S(\alpha, n)$

n / α	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800
4	2,700	4,480	7,620	13,500	25,600	54,590	145,800
5	4,050	8,330	17,790	40,500	102,400	309,340	1312,0
6	6,080	15,460	41,500	121,500	409,600	1753,0	11811,0
7	9,110	28,720	96,830	364,50	1638,0	9933,0	106300,0
8	13,670	53,340	225,940	1093,0	6554,0	56290,0	956600,0

Из таблицы 2.4 можно заметить, что наиболее значимые показатели сглаживающей способности S расположены в правой нижней зоне. В результате математического моделирования нам удалось увидеть прямую зависимость увеличения параметра S от количества витков n , однако применение количества витков n больше 8 не целесообразно, так как это ведет к увеличению металлоёмкости аппарата. Поэтому использовать следующие рациональные параметры работы вибрационного СНД с рецикл каналом: $n=5$, либо $n=6$; $\alpha=0,7$. При приведенных параметрах параметр S варьируется от 309 до 1753 единиц, и

этого достаточно для получения качественных мучных сыпучих смесей на различных предприятиях.

Проанализировав разработанные математические модели процесса смесеприготовления мы решили, что для получения наиболее качественной сыпучей смеси целесообразнее использовать конструкцию вибросмесителя с рецикл каналом, реализующую метод «последовательного разбавления», так как она имеет большую сглаживающую способность.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО 2 ГЛАВЕ

1. При работе смесителя в непрерывном режиме следует принимать величины: коэффициента внутренней рециркуляции α в диапазоне от 0,3 до 0,7 ($0,3 \leq \alpha \leq 0,7$); коэффициента внешней рециркуляции $\beta=0$. При значениях $\alpha > 0,7$ и $\beta > 0$ наблюдается увеличение габаритов смесителя, а, следовательно, и его металлоемкость.

2. Для получения наиболее качественных мучных сыпучих смесей целесообразнее использовать подъемные СНД вибрационного типа, так как их способность сглаживать флуктуации входящих потоков гораздо выше (S варьируется в пределах $1 \div 1580$ единиц), чем у прямоточных СНД (S варьируется в пределах $1 \div 4,6$ единиц).

3. Из рассмотренных схем движения материальных потоков с одноступенчатым (S варьируется в пределах $1 \div 15,81$ единиц) и двухступенчатым (S варьируется в пределах $1 \div 55,61$ единиц) разбавлением наиболее целесообразно использовать схему с двухступенчатым разбавлением, обладающую большей сглаживающей способностью. Поэтому для получения мучной сыпучей смеси наилучшего качества рекомендуем принять значение коэффициентов $\gamma=0,4$ $\delta=0,35$ и $\rho=0,4$ и схему с двухступенчатым разбавлением.

4. Из разработанных, на основе корреляционного анализа, математических моделей выявлено, что для получения наиболее качественной мучной сыпучей смеси целесообразнее использовать вибросмеситель с рецикл каналом, реализующий метод «последовательного разбавления». При количестве витков $n=5$ или $n=6$ и коэффициенте рециркуляции $\alpha=0,7$ сглаживающую способность S варьируется в пределах $309 \div 1753$ единиц.

ГЛАВА 3. ОПИСАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ МУЧНЫХ СЫПУЧИХ СМЕСЕЙ

В данной главе подробно описан лабораторно-экспериментальный стенд, приведено обоснование выбора новой конструкции вибрационного СНД, описаны следующие методики:

- определения пропускной способности отверстия;
- определения скорости вибротранспортирования мучных сыпучих смесей;
- определения потребляемой мощности;
- определения коэффициента неоднородности;
- определения массовой доли аминокислот.

3.1 Описание лабораторно-экспериментального стенда

Для реализации технологической стадии изготовления мучных сыпучих смесей необходимо выполнение условий:

- 1) постоянная подача ингредиентов в аппарат;
- 2) высокая интенсивность и эффективность процесса смешения;
- 3) максимально возможное снижение влияния погрешностей дозирования ингредиентов на качество готовой мучной сыпучей смеси;
- 4) предотвращение явления сегрегации частиц, в результате которого образуются конгломераты из смешиваемых частиц.

Согласно этим требованиям, был разработан и использован для исследования процесса смешения мучных сыпучих смесей лабораторно-экспериментальный стенд, который состоит из: вибрационного СНД с рецикл каналом, дозирочного оборудования, ленточных конвейеров, электродвигателя и пульта управления [80, 171]. Лабораторно-экспериментальный стенд представлен на рисунке 3.1.

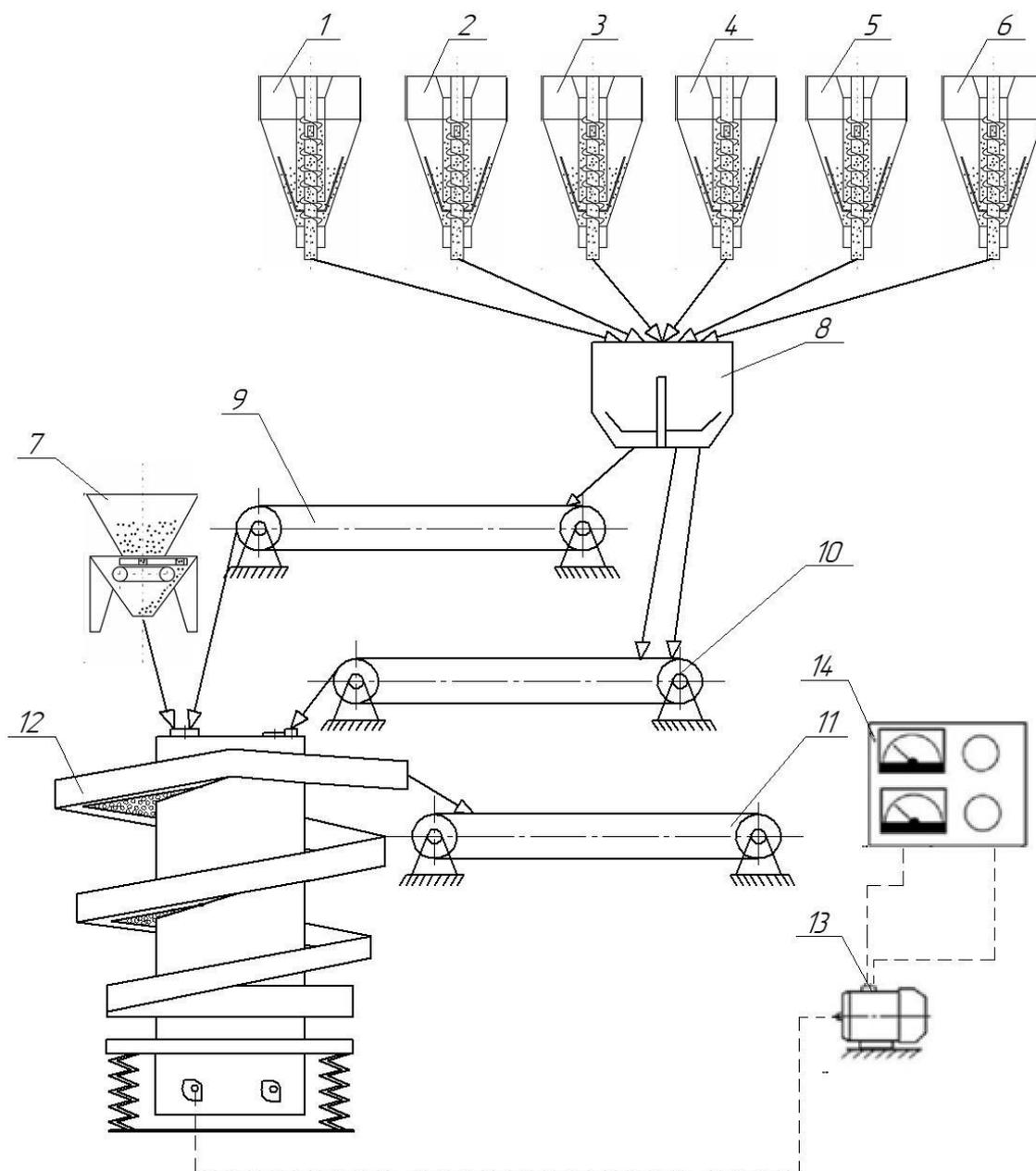


Рисунок 3.1 – Лабораторно-экспериментальный стенд

(1-8 – дозирующее оборудование; 9-11 – ленточные конвейеры;

12 – вибросмеситель с рецикл каналом; 13 – электродвигатель; 14-панель управления)

В связи с необходимостью изменения в широком диапазоне режимов работы вибрационного СНД и дозирующих устройств в качестве электроприводов использовали электродвигатели постоянного тока.

Электроустановка, выступающая источником постоянного тока, состоит из вольтметра, амперметра, выпрямительного мостика ВМ-25, лабораторного автотрансформатора.

Для проведения анализа однородности отбора проб из итоговой смеси, мы использовали дискретные и ленточные пробоотборники непрерывного действия [126].

3.2 Дозирующее оборудование стенда

Эффективность СНД при получении мучных сыпучих смесей высокого качества определяется стабильностью подачи исходных компонентов смеси в смесительный агрегат, она зависит от надежности работы и типа дозирующего оборудования.

Нами при исследованиях были применены объемные дозаторы дискретного и непрерывного действия [1, 2, 7, 37, 62, 133]. Эти дозаторы обладают рядом достоинств: более дешевые в изготовлении и эксплуатации, имеют более простую конструкцию. Новая конструкция вибрационного смесителя достаточно хорошо сглаживает флуктуации (погрешности дозирования) питающих материалопотоков, формируемые этими дозаторами.

3.2.1 Шнековый дозатор

Для дозирования в вибрационный СНД хорошо и плохо-сыпучих материалов (мука пшеничная хлебопекарная, мука чечевичная, мука из бурого риса, кунжутная мука, клейковина сухая изолят сывороточного белка, изолят соевого белка, сахар белый) мы использовали шнековый дозатор. Подача компонентов мучной сыпучей смеси в аппарат отличается внушительной погрешностью дозирования, связанная с неустойчивостью плотности смеси по её объему, так как она способна уплотняться под собственной тяжестью и под воздействием внешних сил. Плотность заполнения межвиткового пространства шнека дозируемым материалом колеблется незначительно, если направление движения материала и сила тяжести будут противоположными. Таким образом,

работа дозирующего устройства с некоторым «подпором» смеси на выходе обеспечивает вполне равномерную его подачу.

В лаборатории КемГУ, кафедры «Технологическое проектирование пищевых производств», с учетом вышеизложенного и на основании а.с. 1064144 [3], был разработан шнековый дозатор, который представлен на рисунке 3.2.

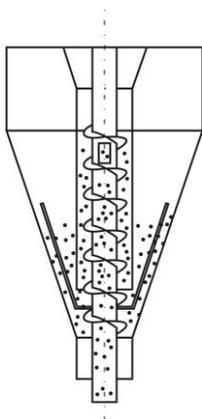


Рисунок 3.2 - Шнековый дозатор

Принцип работы. Компоненты смеси подаются в бункер через загрузочный патрубкок. С помощью ворошителя происходит разрыхление поступившего в дозатор материала. Затем осуществляется его захват нижним витком шнека и перемещение по трубе. Вывод компонентов смеси осуществляется через полую трубу вала достаточно равномерным потоком [2].

Технические характеристики шнекового дозатора:

Объемная производительность, м ³ /ч.....	0,05;...;0,5
Мощность привода, кВт.....	0,5
Погрешность дозирования η , %.....	3;...;6
Частота вращения рабочего органа (число циклов), с ⁻¹	0,1;...;2
Габаритные размеры, м.....	0,6×0,4×0,8
Масса, кг.....	25

3.2.2 Порционный дозатор

Для осуществления подачи в вибрационный СНД ключевого компонента (соль пищевая) нами использовался порционный дозатор, разработанный в лаборатории КемГУ, кафедры «Технологическое проектирование пищевых производств» [1, 7, 133]. Его конструкция представлена на рисунке 3.3.

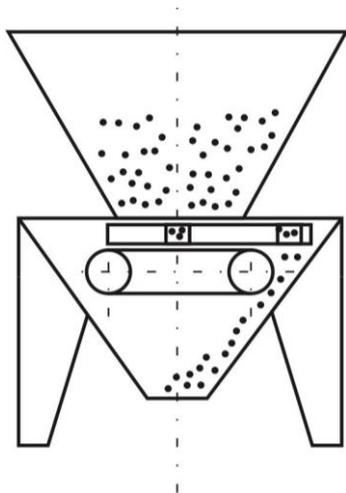


Рисунок 3.3 - Порционный дозатор

Принцип работы. Компоненты мучной сыпучей смеси загружаются в бункер. Под выгрузочным отверстием, находящемся внизу бункера, расположена каретка на направляющих роликах. При движении каретки (вправо или влево) происходит одновременное наполнение одной и опустошение другой мерной камеры.

Технические характеристики порционного дозатора:

Объемная производительность, м ³ /ч.....	0,005;...;0,05
Мощность привода, кВт.....	0,15
Погрешность дозирования η , %.....	1;...;3
Частота вращения рабочего органа (число циклов), с ⁻¹	0,2;...;2
Габаритные размеры, м.....	0,35×0,4×0,35
Масса, кг.....	18

3.3 Конструкция вибросмесителя с рецикл каналом, реализующего метод «последовательного разбавления»

Для производства качественной мучной сыпучей смеси необходимо использовать специализированное смесительное оборудование. На сегодняшний день насчитывается большое разнообразие их видов и конструкций. Рассмотрим основные технические недостатки многих вибрационных смесителей:

- 1) при соотношении смешиваемых компонентов 1:50 и выше получаются смеси недостаточного качества. Это связано с малой продолжительностью движения частиц смеси внутри аппарата;
- 2) невысокая сглаживающая способность;
- 3) недостаточная эффективность и интенсивность процесса смешения.

Предъявляемые для вибрационных смесителей основные требования:

- 1) организация направленного движения компонентов смеси внутри смесительного агрегата для предотвращения «застойных» зон;
- 2) создание дополнительных материалопотоков;
- 3) исключение непостоянства состава итоговой мучной сыпучей смеси, что характеризуется способностью аппарата хорошо сглаживать флуктуации питающих потоков [31, 96].

Исходя из этого, разрабатывая новые конструкции вибрационных СНД необходимо стремиться к увеличению соотношения смешиваемых компонентов и к интенсификации их виброкипения на рабочем органе аппарата.

В лаборатории кафедры «Технологическое проектирование пищевых производств» Кемеровского государственного университета был разработан вибросмеситель непрерывного действия с рецикл каналом, реализующий метод «последовательного разбавления» (патент РФ 2626415), для получения мучных сыпучих смесей, который представлен на рисунке 3.4.

Вибросмеситель с рецикл каналом состоит из вертикального цилиндрического загрузочного бункера 1, патрубков ввода сыпучих компонентов 2, 3 и 4, винтового лотка 6, сквозного отверстия 7, предназначенного для выхода компонентов мучной сыпучей смеси на нижний виток винтового перфорированного лотка 8, выгрузочного патрубка 9 и сплошного кольцевого лотка 10. Винтовой лоток 6, в отличие от лотка 8, наклонен в сторону движения компонентов мучной сыпучей смеси. В стенке цилиндрического загрузочного бункера дополнительно выполнены окна, через которые патрубки ввода 3 и 4 подают отдельные компоненты сыпучей смеси на внешний винтовой лоток, который в этих местах имеет расширения пропорционально количеству поступающего материала.

Смеситель работает следующим образом. Подача компонентов смеси с малым (М) расходом и часть «большого» (Б1) осуществляется в загрузочный бункер 1, откуда через патрубок 2 они поступают на винтовой лоток 6. Под воздействием направленной вибрации они, перемещаясь под уклон, смешиваются

и через сквозное отверстие 7 в стенке бункера поступают на «внешний» перфорированный лоток 8 (основной рабочий орган аппарата).

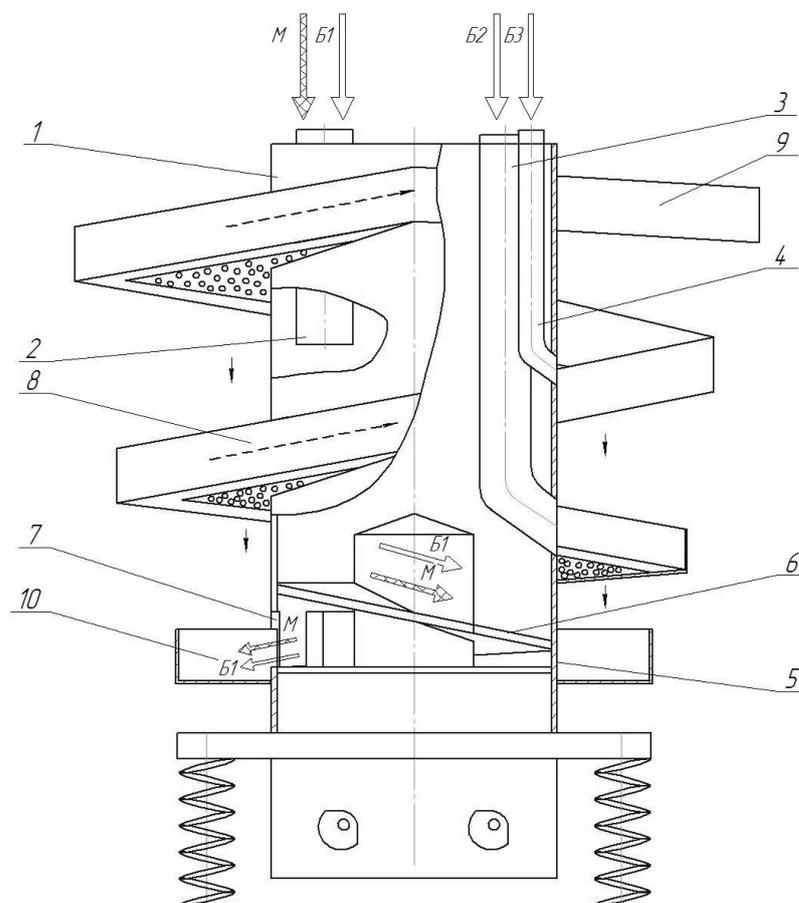


Рисунок 3.4 – Схема вибросмесителя с рецикл каналом

(М – ключевой компонент («малый»), Б1, Б2, Б3 – фоновые компоненты («большие»), 1 – загрузочный бункер, 2, 3, 4 – патрубки ввода сыпучих ингредиентов, 5 – дно, 6 – винтовой лоток, 7 – сквозное отверстие, 8 – винтовой перфорированный лоток, 9 – выгрузочный патрубков, 10 – сплошной кольцевой лоток)

Благодаря тому, что угол подъёма колебаний больше угла подъёма винтовой линии лотка 8, вибрация смешивает и принуждает мучную сыпучую смесь перемещаться вверх. Вторую часть «большого» (Б2) компонента смеси подают через патрубок 3 на лоток 8, который в этом месте имеет расширения пропорционально количеству поступающего материала. Это относится и к месту вывода оставшейся доли компонентов (Б3) через патрубок 4. Если не увеличить ширину лотка, то это приведет к росту высоты виброкипящего слоя. Её рост

уменьшит скорость транспортирования мучной сыпучей смеси и интенсивность его виброкипения. Благодаря рецикл каналу осуществляется возврат некоторой части компонентов на нижележащие витки основного рабочего органа смесителя. Окончание процесса смешивания наступает в момент вывода готовой сыпучей смеси через патрубок 9 из аппарата [107]. Патент представлен в Приложении А.

3.4 Рецептуры мучных сыпучих смесей, применяемых в исследованиях

Проанализировав ситуацию на основных рынках отечественного и зарубежного сырья, в Центре технологий, биохимических и микробиологических исследований Федерального государственного автономного научного учреждения «Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности» (ФГАНУ НИИХП) (г. Москва) были разработаны две мучные сыпучие смеси для проведения экспериментальных исследований [24, 43, 77, 78, 83, 87, 89, 92, 116, 124, 127, 168]. Смесь №1 - мучная хлебопекарная смесь. Смесь №2 - мучная смесь для хлебобулочных изделий с добавлением муки чечевичной и муки из бурого риса. Рецептуры мучных сыпучих смесей и дисперсность их компонентов представлены в таблице 3.1.

Также, в данном институте была разработана методика, позволяющая производить расчет пищевой ценности готового хлебобулочного изделия. Руководствуясь данной методикой, получили следующие результаты: содержание белка в изделиях с подобранной мучной хлебопекарной смесью составило 13,9%, то есть 18,6% от суточной нормы, 23,0% энергетической ценности.

Сырьё соответствовало требованиям действующей нормативной документации, гигиеническим требованиям ГСЭН РФ к качеству и безопасности сырья и пищевых продуктов (СанПиН 2.3.2.1078-01) [118]. Подготовка сырья к производству осуществлялась в соответствии с действующими «Инструкцией по предупреждению попадания посторонних предметов в продукцию» и СП 2.3.4.3258-15 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям по производству хлеба, хлебобулочных и кондитерских изделий» [70, 122].

Таблица 3.1 – Рецептуры мучных сыпучих смесей и дисперсность её компонентов

Наименование сырья	Расход сырья, кг		Дисперсность, м ⁻¹
	Смесь 1	Смесь 2	
Мука пшеничная хлебопекарная I сорт	83,7	74,3	16000-25000
Мука чечевичная цельносмолотая	-	9,3	3500-25000
Мука из бурого риса цельносмолотая	-	9,3	3500-25000
Кунжутная мука	4,2	-	11000-16000
Изолят сывороточного белка	4,2	-	10000-20000
Изолят соевого белка	4,2	-	10000-20000
Сахар белый	1,6	1,9	500-700
Соль пищевая	1,3	1,4	300-500
Клейковина сухая	0,8	3,8	5500-6500
Итого:	100,0	100,0	

Для замеса теста из мучных сыпучих смесей необходимо добавить следующие компоненты, которые представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Рецептура теста из мучных сыпучих смесей

Компоненты смеси	Расход сырья, кг	
	Смесь 1	Смесь 2
Смесь 1	100	-
Смесь 2	-	100
Дрожжи хлебопекарные прессованные	2,0	2,0
Масло подсолнечное рафинированное дезодорированное	1,7	1,7
Вода	55,0	55,0

Режим приготовления теста из мучных сыпучих смесей представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Режим приготовления теста из мучных сыпучих смесей

Параметр	Значение
Влажность, %	41,0
Температура начальная, °С	26-29
Продолжительность брожения, мин	55
Кислотность теста конечная, град	3,9

3.5 Методики проведения экспериментальных исследований

В качестве вибропривода был выбран инерционный двухвальный четырехдебалансный инерционный вибратор. Его главным преимуществом является способность работать в зарезонансном режиме [135].

Во всех экспериментальных исследованиях в качестве влияющих параметров были использованы технологические параметры вибрации: амплитуда ($A=2,5; \dots; 4,5$ мм), угол колебаний ($\beta=30; 45$ и 60°), частота колебаний ($f=16,66; \dots; 33,33$ Гц).

Угол вибрации регулировался путем поворота дебалансов относительно оси по методике представленной в разделе 3.5.1. Амплитуда колебаний установки изменялась путем увеличения или уменьшения массы дебалансов. Частота вибрации регулировалась изменением напряжения, подаваемого на электродвигатель вибропривода посредством ЛАТРа.

3.5.1 Настройка угла вибрации

Для настройки угла вибрации необходимо с помощью болта закрепить второй вал вибратора таким образом, чтобы линия соединяющая центр вращения и центр массы третьего дебаланса находилась строго в горизонтальном положении. После чего ослабляются гайки крепления тех дебалансов, положение которых необходимо изменить. Затем с помощью съемного устройства, предусмотренного конструкцией необходимо снять дебаланс с конического

хвостовика вала. Выставив дебалансы в нужное положение, их снова закрепляют крепежными гайками и снимают крепление второго вала.

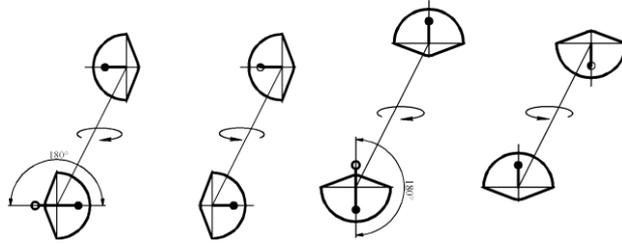


Рисунок 3.5 - Схема настройки положения дебалансов для угла вибрации $\beta=0^\circ$

Для схемы, представленной на рисунке 3.5 вертикальная составляющая амплитуды колебаний $A_v=0$ и горизонтальная составляющая амплитуды колебаний $A_g \neq 0$, $\beta=0^\circ$.

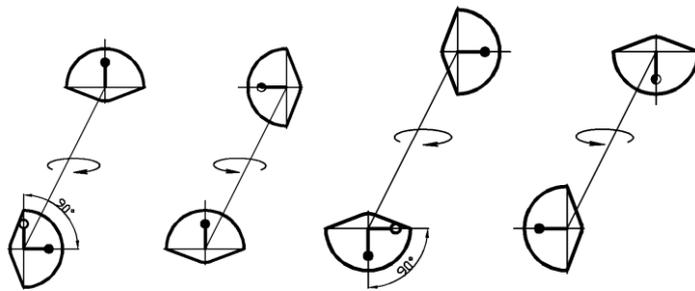


Рисунок 3.6 - Схема настройки положения дебалансов для угла вибрации $\beta=45^\circ$

Для схемы, представленной на рисунке 3.6 вертикальная A_v и горизонтальная A_g составляющие $\neq 0$, $\beta=45^\circ$.

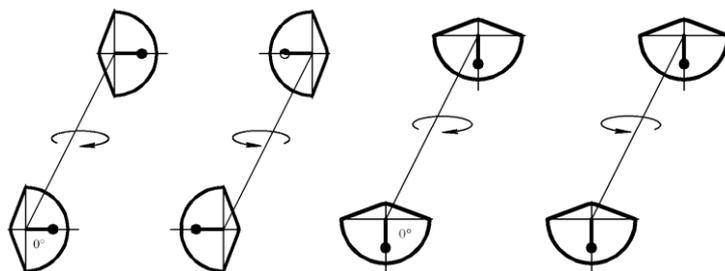


Рисунок 3.7 - Схема настройки положения дебалансов для угла вибрации $\beta=90^\circ$

Вертикальная составляющие амплитуды колебаний $A_v \neq 0$ и горизонтальная составляющая амплитуды колебаний $A_g=0$, $\beta=90^\circ$ для схемы, представленной на рисунке 3.7.

На рисунках представлены схемы настройки угла вибрации для частных случаев. Для конкретных случаев угол вибрации находится по формуле:

$$\beta = \left(90^\circ - \frac{1}{2} \cdot \theta \right) \quad (3.1)$$

где θ - угол между линиями, мысленно проведенными от центра вращения дебалансов к их центрам тяжести находящихся на одной оси.

Для проверки точности настройки на корпусе двухвального инерционного вибратора на уровне среднего радиуса внешнего рабочего органа смесителя закреплена табличка, представленная на рисунке 3.8.

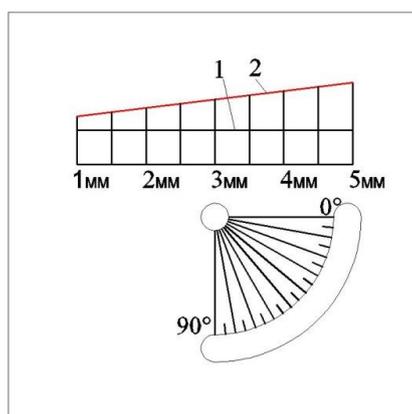


Рисунок 3.8 - Табличка для контроля угла и амплитуды вибрации

Табличка позволяет увидеть значение действительного угла вибрации и амплитуду колебаний. Для этого необходимо, после запуска и выхода смесителя на стационарный режим работы, ослабить болты крепление таблички и медленно поворачивая ее достичь, чтобы линии 1 и 2 при визуальном наблюдении «слились» в единую. После закрепления таблички в таком положении можно определить амплитуду колебаний и угол вибрации.

3.5.2 Контроль частоты вращения валов вибропривода

В связи с необходимостью контроля точности, регулирования частоты вращения валов вибропривода (частоты колебания смесителя) использовался строботометр ТСт 100.

Работа строботометра ТСт 100 основывается на эффекте кажущейся остановки вращения вала. Методика контроля частоты вращения валов вибропривода. На муфту, соединяющую вал вибратора с валом электродвигателя, мелом наносилась метка. После прогрева строботометра в течении 3-5 мин, включалось питание импульсной лампы. С помощью кнопок выбирался интервал частот, в котором будут проходить измерения. С помощью 3 рукояток, различной точности настройки частоты, выставлялась частота мерцания лампы строботометра, которая отображалась на электронном циферблате.

После включения питания, запуска и вывода на стационарный режим работы вибрационного смесителя свет импульсной лампы поворачивается на изучаемый объект путем соответствующей установки. С помощью рукоятки ЛАТРа производилась подстройка частоты вращения вала до тех пор, пока не наблюдался эффект кажущейся остановки. В этом случае частота вращения валов вибропривода соответствовала частоте, указанной на электронном циферблате.

3.5.3 Методика определения качества смеси

В ходе экспериментальных исследований с помощью коэффициента неоднородности V_c проводили оценку качества мучной сыпучей смеси. Поэтому появилась необходимость нахождения концентрации ключевого компонента в смеси (соли пищевой). Для этого производился отбор пробы из смеси. Использовался метод титрования, так как он является наиболее распространенным методом анализа соли.

Метод титрования осуществляется следующим образом: для определения концентрации аналита (неизвестный раствор), используется титрант (раствор

известной концентрации). В зависимости от цвета, полученного в результате воздействия химического индикатора, судят о количестве титранта.

Самым популярным способом определения концентрации соли является метод Мора, который осуществляется ручным титрованием с использованием в качестве титранта нитрата серебра, а в качестве индикатора цвета - хромат калия. В результате реакции между хлоридом и ионами серебра происходит образование нерастворимого осадка хлорида серебра (AgCl). Титрант добавляют до того момента, пока все хлорид-ионы не вступят с ним в реакцию. После чего полученные ионы серебра будут связываться с хроматом калия для получения красного цвета в растворе. Затем осуществляется субъективная интерпретация цвета и титрование заканчивается. Титриметрический анализ позволяет определять качественный и количественный состав анализируемого вещества [50, 87, 88].

После того, как нашли значение концентрации ключевого компонента в смеси (соли пищевой), определяли коэффициент неоднородности смеси V_c при помощи следующего уравнения:

$$V_c = \frac{S \times 100}{\bar{C}} = \frac{100}{\bar{C}} \times \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum (C_i - \bar{C})^2}, \% \quad (3.2)$$

где S - среднеквадратическое отклонение массы ключевого компонента в образце;

\bar{C} - среднеарифметическая величина массы ключевого компонента в образце;

C_i – величина массы ключевого компонента в i -ом образце;

n - количество образцов.

Если $V_c \rightarrow 0$, то смесь считается однородной. И наоборот, чем больше значение V_c , тем менее однородна смесь [38, 169].

3.5.4 Методика определения скорости вибротранспортирования мучной сыпучей смеси

Скорость вибротранспортирования мучной сыпучей смеси по рабочему органу ВС, оказывающая значительное влияние на его производительность и размеры, зависит от настраиваемых технологических параметров (амплитуда A , угол β , частота колебаний f , перфорация на рабочем органе аппарата d , высота виброкипящего слоя (ВКС)). Экспериментальные исследования были проведены по методике [71, 114, 115, 139, 143]:

1. Определение средней длины траектории движения ингредиентов смеси ($l_{срi}, м$) по рабочей поверхности ВС:

$$l_{срi} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (D_n + D_{вн})}{4 \cdot \cos \gamma}, \quad (3.3)$$

где $D_n, D_{вн}$ – наружный, внутренний диаметры рабочей поверхности ВС, м;
 γ – угол наклона рабочей поверхности ВС.

Длина траектории - это длина поверхности, по которой смесь транспортировалась от загрузки исходных компонентов до выгрузки готового полуфабриката.

2. Установка основных технологических параметров вибрации (A, β и f) работы аппарата, после чего его вывод на стационарный режим.

3. Внесение в поток мучной сыпучей смеси частицы-индикатора (подкрашенная частица пищевой соли). Измерение промежутка времени перемещения частицы-индикатора ($t_{ли}, с$) по винтовому рабочему органу от входа в аппарат до её выхода из него.

4. Определение скорости вибротранспортирования смеси ($v_{срi}, м/с$) по рабочей поверхности ВС:

$$v_{срi} = \frac{l_{срi}}{t_{ли}}, \quad (3.4)$$

Кроме того, в данной серии экспериментов исследовалось влияние перфорации диаметрами 5 и 7 мм на скорость вибротранспортирования. Данные диаметры перфорации приняты для предотвращения влияния изменения высоты ВКС на скорость вибротранспортирования, т.к. при увеличении данных параметров наблюдалось резкое уменьшение высоты ВКС смеси на рабочих витках [128].

3.5.5 Методика определения пропускной способности отверстий перфорации

Перфорация рабочего органа аппарата требуется для создания рециркулирующих потоков в аппарате. Для расчета необходимого количества отверстий на рабочем органе достаточно знать производительность одного отверстия, которая зависит от его диаметра, физико-механических свойств компонентов, ВКС и параметров колебаний.

Исследовалась пропускная способность отверстий перфорации диаметрами $\varnothing=2,3,5$ и 7 мм. После установки параметров вибрации смеситель выводился на стационарный режим. Далее в течении 60 сек. производили отбор материала, который просыпался через одно из отверстий перфорации рабочего органа. Отбор производился по 5 раз в каждой серии. Затем пробы взвешивались на весах, с точностью до сотых грамма. После получали среднее значение проб, которые заносили в результирующую таблицу [29, 54].

3.5.6 Методика определения влияния параметров вибрации и массы смесителя на потребляемую мощность

При определении эффективности процесса смешения важную роль играет потребляемая мощность [153, 156, 173]. Исследование влияния режимных параметров на потребляемую мощность проводилось на двух конструкциях вибрационного СНД (патент № 2626415) [107], отличающихся количеством

витков основного рабочего органа и массой. Первый смеситель имел массу 16,5 кг и состоял из 4 витков основного рабочего органа, в то время, как второй имел 8 витков и его масса составляла 25,5 кг. Определение взаимного влияния режимных параметров смесительного агрегата на потребляемую мощность осуществлялось по следующей методике [53]:

1. Подключали ВС к амперметру, вольтметру, ваттметру согласно рисунку 3.9.
2. Вывод ВС на стационарный режим работы после установки режимных параметров.
3. Фиксировали показания напряжения (U , В) и силы тока (I , А).
4. Рассчитывали потребляемую мощность (N , Вт) по формуле:

$$N = I \cdot U, \quad (3.5)$$

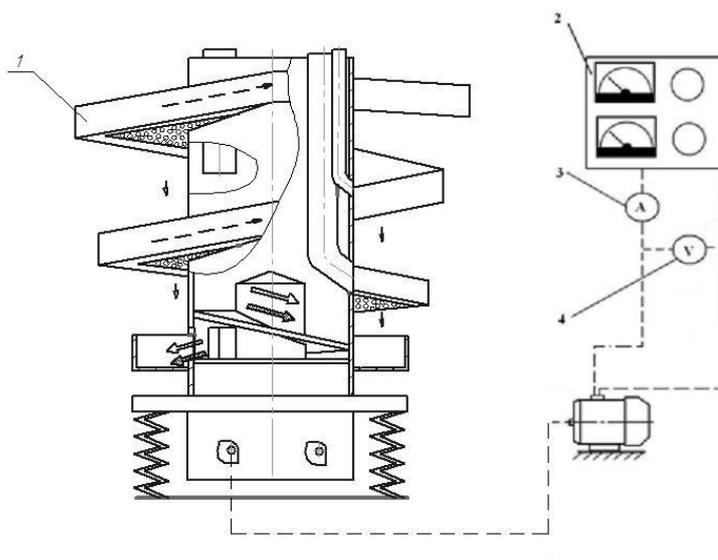


Рисунок 3.9 - Схема подключения оригинального вибрационного смесителя для определения потребляемой мощности

(1 – вибрационный СНД; 2 – пульт управления; 3-амперметр; 4 – вольтметр)

3.5.7 Методика определения аминокислотного сора

Биологическую ценность определяли по результатам аминокислотного анализа образцов (аминокислотного сора), выполненного на базе

Испытательного центра федерального государственного бюджетного учреждения «Кемеровская межобластная ветеринарная лаборатория».

Аминокислотный скор определяется по следующей формуле, %:

$$\text{Аминокислотный скор} = \frac{\text{мг аминокислоты в 1 г белка}}{\text{мг аминокислоты в 1 г эталона}} \times 100 \quad (3.6)$$

В 1 г эталонного белка (по ФАО/ВОЗ) содержится восемь незаменимых аминокислот в количестве, мг: 40,0-изолейцин; 70,0-лейцин; 50,0-валин; 55,0-лизин; 35,0-метионин+цистин; 60,0-фенилаланин+тирозин; 40,0-треонин; 10,0-триптофан. Сумма незаменимых аминокислот (НАК) составляет 360 мг/1 г белка.

Для определения массовой доли аминокислот в готовом хлебобулочном изделии была использована методика капиллярного электрофореза «Капель», с помощью которой можно узнать общее содержание аминокислот в исследуемых образцах.

Используемое при исследованиях оборудование: система капиллярного электрофореза «Капель - 105 М», блок озоления Block-Digest 6, весы лабораторные, сушильный шкаф серия FD Модель 53, центрифуга лабораторная настольная Mini Spin. С помощью специальной программы, установленной на компьютер, осуществляется сбор, обработка и вывод данных исследования [47].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО 3 ГЛАВЕ

1. Для получения мучных сыпучих смесей был разработан лабораторно-экспериментальный стенд, который состоит из вибросмесителя с рецикл каналом, реализующего метод «последовательного разбавления», дозирочного оборудования, ленточных конвейеров, электродвигателя и пульта управления.

2. На основе выявленных в 1 главе недостатков, был разработан вибросмеситель непрерывного действия с рецикл каналом (патент РФ 2626415), обладающий рядом преимуществ: способен значительно сглаживать флуктуации питающих потоков, при соотношении компонентов 1:50 и выше получают мучные сыпучие смеси достаточно высокого качества.

3. В данной главе представлены методики определения: коэффициента неоднородности, скорости вибротранспортирования мучной сыпучей смеси; пропускной способности отверстия; потребляемой мощности; аминокислотного сора.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОСМЕСИТЕЛЯ С РЕЦИКЛ КАНАЛОМ

4.1 Определение скорости вибротранспортирования мучной сыпучей смеси

Данная серия экспериментов была проведена на лабораторном вибросмесителе с рецикл каналом (патент РФ 2626415) с наружным $D_n=320$ мм и внутренним $D_{вн}=270$ мм диаметрами, углом наклона $\gamma=4^\circ 31'$ и со средней длиной $l_{cp}=2,36$ м его рабочей поверхности, руководствуясь методикой, изложенной в разделе 3.5.4. Варьируемые технологические параметры: $\beta=30; 45$ и 60° , $A=2,5; \dots; 4,5$ мм, $f=16,66; \dots; 33,33$ Гц, ВКС 20;...;40 мм, $\varnothing=5; 7$ мм; без перфорации.

Результаты исследования по определению скорости вибротранспортирования смеси №1 по рабочему органу ВС в зависимости от применяемых технологических параметров его работы представлены в виде таблиц 4.1-4.5.

Таблица 4.1 – Значения скорости вибротранспортирования v в зависимости от угла β и частоты колебаний f

Технологические параметры		Скорость вибротранспортирования v , м/с
Угол колебаний β , °	Частота колебаний f , Гц	
A=4,5 мм, ВКС=20 мм, без перфорации		
30	16,6	0,072
45		0,066
60		0,041
30	25	0,123
45		0,112
60		0,068
30	33,3	0,127
45		0,162
60		0,127

Таблица 4.2 – Значения скорости вибротранспортирования v в зависимости от амплитуды A и частоты колебаний f

Технологические параметры		Скорость вибротранспортирования v , м/с
Амплитуда колебаний A , мм	Частота колебаний f , Гц	
$\beta=45^\circ$, ВКС=20 мм, без перфорации		
2,5	16,6	0,027
3,5		0,066
4,5		0,066
2,5	25	0,047
3,5		0,099
4,5		0,112
2,5	33,3	0,094
3,5		0,131
4,5		0,162

Из таблицы 4.1 можно заметить, что самые неблагоприятные условия для транспортирования мучной сыпучей смеси $v=0,041$ м/с создаются при угле колебаний $\beta=60^\circ$. При угле колебаний $\beta=45^\circ$ направленное возвратно-поступательное движение компонентов смеси осуществляется гораздо интенсивнее, поэтому и наблюдается наибольшее значение скорости транспортирования исследуемой смеси $v=0,162$ м/с.

Из таблицы 4.2 видно, что наименьшие показатели скорости $v=0,027$ м/с фиксируются при $A=2,5$ мм, а наибольшие $v=0,162$ м/с при $A=4,5$ мм. Следовательно, чем выше частота f и амплитуда A колебаний, тем больше скорость вибротранспортирования смеси v . Амплитуда отвечает за отрывание компонентов смеси на определенную высоту от поверхности рабочего органа аппарата, тем самым способствуя лучшему продвижению мучной сыпучей смеси по нему.

Таблица 4.3 – Значения скорости вибротранспортирования v в зависимости от высоты ВКС и частоты колебаний f

Технологические параметры		Скорость вибротранспортирования v , м/с
Высота ВКС	Частота колебаний f , Гц	
$\beta = 45^\circ$, $A=4,5$ мм, без перфорации		
20	16,6	0,027
30		0,022
40		0,018
20	25	0,047
30		0,030
40		0,021
20	33,3	0,094
30		0,041
40		0,031

Таблица 4.4 – Значения скорости вибротранспортирования v в зависимости от частоты колебаний f и диаметра перфорации \emptyset

Технологические параметры		Скорость вибротранспортирования v , м/с
Диаметр перфорации \emptyset , мм	Частота колебаний f , Гц	
$\beta = 45^\circ$, $A=4,5$ мм, ВКС=20 мм		
0	16,6	0,027
5		0,129
7		0,129
0	25	0,047
5		0,162
7		0,215
0	33,3	0,094
5		0,309
7		0,414

Из данных, представленных в таблице 4.3, ясно, что при высоте ВКС=20 мм наблюдается наибольшая скорость перемещения смеси $v=0,094$ м/с, а при ВКС=40 мм – наименьшая $v=0,018$ м/с. Соответственно, чем ниже ВКС смеси и выше частота колебаний f , тем хуже её истечение через перфорацию и соответственно, выше скорость её транспортирования.

Из таблицы 4.4 заметно, что наименьшие показатели скорости перемещения компонентов смеси $v=0,027$ м/с наблюдаются при отсутствии перфорации рабочего органа, а максимальные $v=0,414$ м/с при диаметре перфорации $\varnothing = 7$ мм. Можно прийти к заключению, что скорость транспортирования мучной сыпучей смеси тем выше, чем больше диаметр перфорации \varnothing . Для исследования зависимости скорости перемещения мучной сыпучей смеси от площади перфорации рабочего органа смесительного агрегата были приняты диаметры отверстий 5 и 7 мм. Это связано с тем, что при больших показателях площади перфорации высота ВКС мучной сыпучей смеси уменьшалась, в то время как при $\varnothing = 2$ мм наблюдалось её увеличение. А увеличение высоты приводит к уменьшению скорости транспортирования.

Таблица 4.5 – Значения скорости вибротранспортирования v в зависимости от частоты колебаний f и сыпучесть компонентов смеси

Технологические параметры		Скорость вибротранспортирования v , м/с
Сыпучесть компонентов	Частота колебаний f , Гц	
$\beta = 45^\circ$, $A=4,5$ мм, ВКС=20 мм, без перфорации		
Мука пшеничная	16,6	0,066
Сахар-песок		0,157
Соль		0,113
Мука пшеничная	25	0,112
Сахар-песок		0,191
Соль поваренная		0,191
Мука пшеничная	33,3	0,162
Сахар-песок		0,261
Соль поваренная		0,227

Как видно из таблицы 4.5, самая высокая скорость транспортирования $v=0,261$ м/с наблюдается для сахара-песка при $f=33,3$ Гц, а самая маленькая $v=0,066$ м/с при $f=16,6$ Гц – для муки пшеничной. Из этого следует, что чем больше показатель сыпучести компонента, тем выше его скорость.

Анализ результатов исследования показал, что во всех представленных случаях рост частоты (f) и амплитуды (A) колебаний вызывает увеличение скорости вибротранспортирования смеси (v) по рабочей поверхности ВС [93].

Остальные результаты исследования влияния технологических параметров на скорость вибротранспортирования представлены в Приложении Б.

4.2 Определение пропускной способности отверстий рабочего органа вибрационного СНД

Далее проводились исследования по определению пропускной способности отверстия рабочего органа ВС по методике, представленной в разделе 3.5.5. Результаты данных исследований представлены в таблицах 4.6-4.9.

Таблица 4.6 – Значения расхода мучной сыпучей смеси через отверстия $m_{отв}$ в зависимости от диаметра перфорации \varnothing и частоты колебаний f

Технологические параметры		Расход через отверстие $m_{отв}$, кг/с
Диаметр перфорации \varnothing , мм	Частота колебаний f , Гц	
$\beta = 45^\circ, A = 4,5$ мм, ВКС=20 мм		
7	16,6	0,0041
10		0,0048
7	25	0,0054
10		0,0056
7	33,3	0,0044
10		0,0048

Таблица 4.7 – Значения расхода мучной сыпучей смеси через отверстия $m_{отв}$ в зависимости от высоты ВКС и частоты колебаний f

Технологические параметры		Расход через отверстие $m_{отв}$, кг/с
Высота ВКС	Частота колебаний f , Гц	
$\beta = 45^\circ, A = 4,5$ мм, $\varnothing = 7$ мм		
20	16,6	0,0033
30		0,0036
40		0,0041
20	25	0,0041
30		0,0047
40		0,0054
20	33,3	0,0031
30		0,0041
40		0,0044

Как видно из таблицы 4.6, расход мучной сыпучей смеси через отверстие $m_{отв}$ имеет наибольший показатель $m_{отв}=0,0056$ кг/с при диаметре перфорации $\varnothing=10$ мм. Получается что он тем выше, чем больше размер диаметра перфорации \varnothing рабочей поверхности ВС.

Из таблицы 4.7 очевидно, что больший расход через отверстие $m_{отв}=0,0054$ кг/с наблюдается при высоте ВКС=40 мм. Значит, чем выше высота ВКС, тем больше расход через отверстие $m_{отв}$.

Таблица 4.8 – Значения расхода мучной сыпучей смеси через отверстия $m_{отв}$ в зависимости от амплитуды A и частоты колебаний f

Технологические параметры		Расход через отверстие $m_{отв}$, кг/с
Амплитуда колебаний A , мм	Частота колебаний f , Гц	
$\beta=45^\circ$, ВКС=20 мм, $\varnothing=7$ мм		
2,5	16,6	0,0028
3,5		0,0023
4,5		0,0033
2,5	25	0,0037
3,5		0,0031
4,5		0,0041
2,5	33,3	0,0032
3,5		0,0026
4,5		0,0031

Таблица 4.9 – Значения расхода мучной сыпучей смеси через отверстия $m_{отв}$ в зависимости от угла β и частоты колебаний f

Технологические параметры		Расход через отверстие $m_{отв}$, кг/с
Угол колебаний β , °	Частота колебаний f , Гц	
$A=4,5$ мм, ВКС=20 мм, $\varnothing=7$ мм		
30	16,6	0,0041
45		0,0020
60		0,0015
30	25	0,0054
45		0,0024
60		0,0018
30	33,3	0,0044
45		0,0022
60		0,0016

Из таблицы 4.8 можно увидеть, что расход через отверстие достигает максимального значения $m_{отв}=0,0041$ кг/с при $A=4,5$ мм. Из этого следует, что значение расхода смеси через отверстие $m_{отв}$ тем существеннее, чем выше амплитуда A колебаний.

Как видим в таблице 4.9 наивысший показатель расхода смеси через отверстие $m_{отв}=0,0054$ кг/с наблюдается при $\beta=30^\circ$. Из этого вытекает, что чем ниже угол колебаний β , тем больше расход через отверстие $m_{отв}$.

Анализ результатов исследования пропускной способности отверстия позволил сделать вывод: наблюдается уменьшение пропускной способности отверстий с увеличением амплитуды колебаний и высоты ВКС [29].

Остальные результаты исследования пропускной способности отверстий рабочего органа смесителя представлены в Приложении В.

4.3 Определение затрат энергии на смешивание

Данные экспериментальные исследования проводились по методике, представленной в разделе 3.5.6. Результаты исследования зависимости потребляемой мощности от амплитуды (A) и частоты (f) колебаний ВС массами 16,5 кг и 25,5 кг представлены в таблицах 4.10-4.11, соответственно.

Так как масса мучной сыпучей смеси, находящейся на витках смесителя незначительна, в сравнении с самим аппаратом, то ее влиянием пренебрежём.

Таблица 4.10 – Значения потребляемой мощности (N) смесителя массой 16,5 кг в зависимости от амплитуды (A) и частоты (f) колебаний

Технологические параметры		Потребляемая мощность N , кВт
Амплитуда колебаний A , мм	Частота колебаний f , Гц	
$\beta = 45^\circ$, ВКС=20 мм, $\varnothing = 7$ мм		
2,5	16,6	0,1431
3,5		0,1431
4,5		0,1431
2,5	25	0,2750
3,5		0,2770
4,5		0,2790
2,5	33,3	0,4000
3,5		0,5000
4,5		0,5540

Таблица 4.11 – Значения потребляемой мощности (N) смесителя массой 25,5 кг в зависимости от амплитуды (A) и частоты (f) колебаний

Технологические параметры		Потребляемая мощность N , кВт
Амплитуда колебаний A , мм	Частота колебаний f , Гц	
$\beta = 45^\circ$, ВКС=20 мм, $\varnothing = 7$ мм		
2,5	16,6	0,1564
3,5		0,1564
4,5		0,1564
2,5	25	0,1869
3,5		0,2000
4,5		0,2679
2,5	33,3	0,3856
3,5		0,4058
4,5		0,5490

Из таблиц 4.10 и 4.11 следует, что для вибрационного СНД с составляющей его массой 16,5 кг значения потребляемой мощности больше в сравнении со смесителем массой 25,5 кг. Для стабильной работы смесителя массой 25,5 кг необходимо значение частоты колебаний как минимум 20 Гц, в то время как для СНД массой 16,5 кг достаточно 16 Гц. Максимальные значения потребляемой мощности $N=0,5540$ кВт и $N=0,5490$ кВт наблюдаются при амплитуде $A=4,5$ мм и частоте колебаний $f=33,3$ Гц. Это означает, что чем выше амплитуда колебаний A , тем больше значение потребляемой мощности N [93].

Остальные результаты исследования зависимости потребляемой мощности от технологических параметров представлены в Приложении Г.

4.4 Определение рациональных параметров работы вибрационного смесителя для получения мучных сыпучих смесей

Для определения рациональных технологических параметров работы ВС при получении смесей были проведены 2 полнофакторных эксперимента (для конструкции базовой [103] и конструкции вибросмесителя с рецикл каналом [107]) [40, 99, 129, 132, 150]. В ходе первого изменяли следующие параметры: угол вибрации ($\beta = 30; 45; 60^\circ$), амплитуду ($A = 2,5; \dots; 4,5$ мм) и частоту колебаний ($f = 16,67; \dots; 33,33$ Гц). В ходе второго - соотношение компонентов (долю ключевого компонента) в диапазоне 1:24 (доля ключевого компонента 0,04); ...; 1:5 (0,2), амплитуду ($A = 2,5; \dots; 4,5$ мм) и частоту колебаний ($f = 16,67; \dots; 33,33$ Гц).

Оценку качества мучных сыпучих смесей определяли по методике, представленной в разделе 3.5.3.

Исследование влияния параметров вибрации на качество смешивания базовой конструкции определялось с целью установления угла вибрации, при котором готовая мучная сыпучая смесь получается наилучшего качества.

В ходе исследования на базовой конструкции соотношение смешиваемых ингредиентов составляло 1:100. Для определения качества смеси, получаемой на базовой конструкции вибрационного СНД использовалась мучная сыпучая смесь №1.

На качество готовой мучной сыпучей смеси оказывают влияние различные факторы, шаги и интервалы варьирования которых представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 - Шаги и интервалы варьирования факторов, оказывающих влияние на качество готовой мучной сыпучей смеси

Уровень	Фактор и его обозначение		
	X_1 – угол вибрации, β , °	X_2 – амплитуда колебания, А, мм	X_3 – частота колебания, f, Гц
Нижний	30	2,5	33,33
Цент	45	3,5	25
Верхний	60	4,5	16,6
Интервал варьирования	15	1	8,33

Качество смешивания, которое оценивается с помощью коэффициента неоднородности V_c , а также варьируемые в натуральном и кодированном виде технологические параметры работы ВС, представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 - Варьируемые параметры и величина коэффициента неоднородности V_c

В кодированном виде			В натуральном виде			Коэффициент неоднородности V_c , %
X_1	X_2	X_3	β , °	А, мм	f, Гц	
1	2	3	4	5	6	7
-1	-1	-1	30	2,5	16,67	20,87
1	-1	-1	60	2,5	16,67	25,46
0	-1	-1	45	2,5	16,67	18,89
-1	1	-1	30	4,5	16,67	15,04
1	1	-1	60	4,5	16,67	21,54
0	1	-1	45	4,5	16,67	12,83
-1	0	-1	30	3,5	16,67	20,22

1	2	3	4	5	6	7
1	0	-1	60	3,5	16,67	22,4
0	0	-1	45	3,5	16,67	16,88
-1	-1	1	30	2,5	33,33	13,64
1	-1	1	60	2,5	33,33	19,49
0	-1	1	45	2,5	33,33	10,83
-1	1	1	30	4,5	33,33	7,07
1	1	1	60	4,5	33,33	16,05
0	1	1	45	4,5	33,33	4
-1	0	1	30	3,5	33,33	11,4
1	0	1	60	3,5	33,33	16,75
0	0	1	45	3,5	33,33	7,43
-1	-1	0	30	2,5	25	15,79
1	-1	0	60	2,5	25	21,19
0	-1	0	45	2,5	25	14,24
-1	1	0	30	4,5	25	9,98
1	1	0	60	4,5	25	17,42
0	1	0	45	4,5	25	6,47
-1	0	0	30	3,5	25	12,68
1	0	0	60	3,5	25	18,12
0	0	0	45	3,5	25	9,78

Из таблицы 4.13 можно заметить, что вибрационный СНД, работающий при технологических параметрах работы, как угол $\beta = 45^\circ$, частота $f = 33,33$ Гц и амплитуда колебаний $A=4,5$ мм выпускает высококачественные смеси, так как коэффициент неоднородности V_c составляет 4%. Самая худшая по качеству смесь ($V_c=25,46\%$) производится при угле колебаний $\beta = 60^\circ$, частоте $f = 16,67$ Гц и амплитуде колебаний $A = 2,5$ мм. Из этого следует, что чем выше показатели A

и f , тем лучше качество смеси. Обработка экспериментальных данных осуществлялась в программе «*Statistica*» [26, 163].

Представим зависимости коэффициента неоднородности V_c от исследуемых параметров для смеси №1 в виде графиков, представленных на рисунках 4.1-4.3.

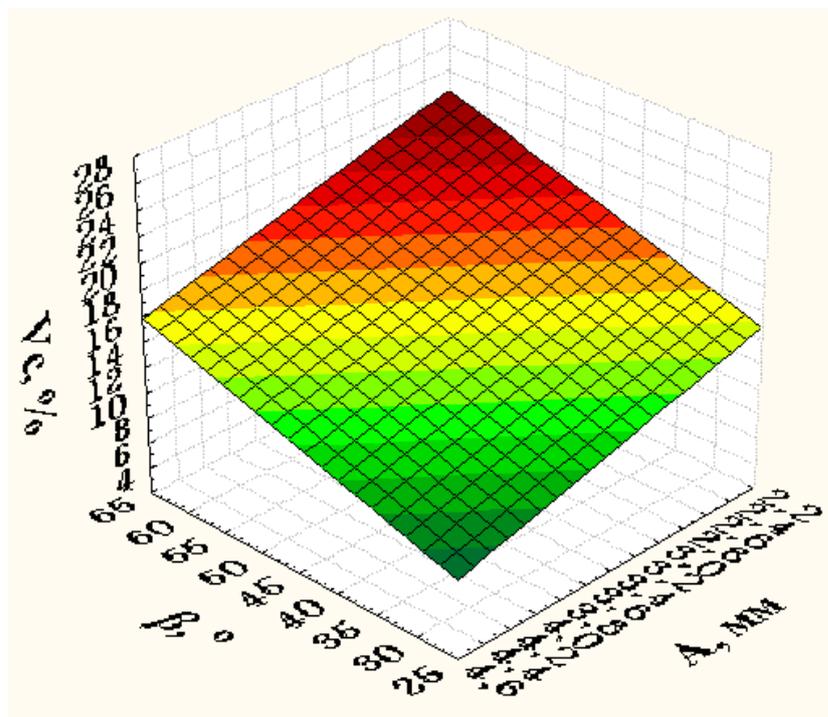


Рисунок 4.1 - Графическая зависимость коэффициента неоднородности (V_c) от амплитуды (A) и угла (β) колебаний

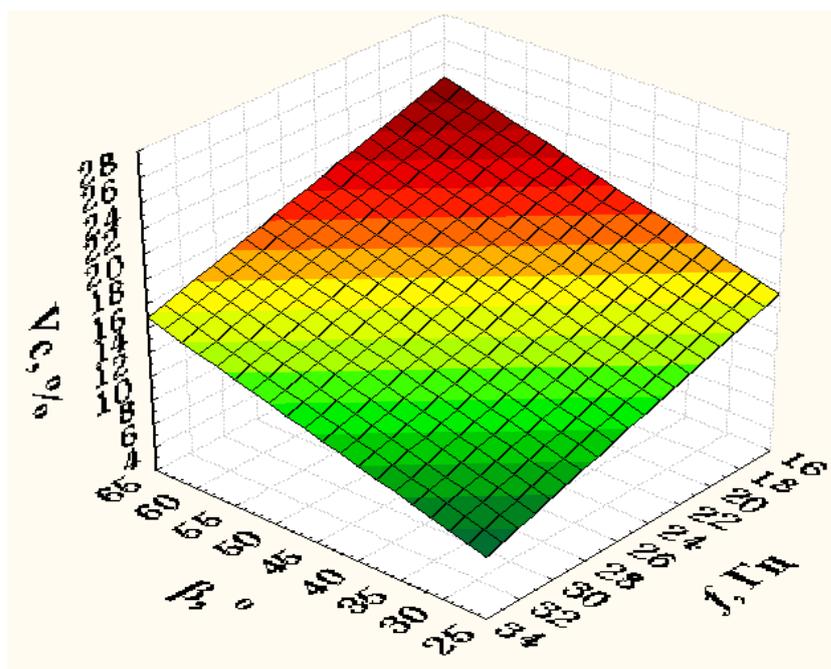


Рисунок 4.2 – Графическая зависимость коэффициента неоднородности (V_c) от частоты (f) и угла (β) колебаний

На рисунке 4.1 заметно, что при амплитуде $A=4,5$ мм и угле колебаний $\beta=45^\circ$ выходит готовая мучная сыпучая смесь наилучшего качества ($V_c = 4,3\%$).

Из рисунка 4.2 следует, что при угле $\beta=45^\circ$ и частоте колебаний $f = 33,9$ Гц выходит готовая мучная сыпучая смесь наивысшего качества ($V_c = 5,9\%$).

Уравнения регрессий, которые описывают зависимости, представленные на рисунках 4.1 и 4.2, соответственно:

$$V_c = 25,455 - 0,192 \cdot \beta - 2,78 \cdot A \quad (4.1) \quad V_c = 29,682 - 0,192 \cdot \beta - 0,45 \cdot f \quad (4.2)$$

Из уравнений (4.1, 4.2) видно, что большее влияние на коэффициент неоднородности V_c оказывает амплитуда A и частота колебаний f , а наименьшее - угол колебаний β .

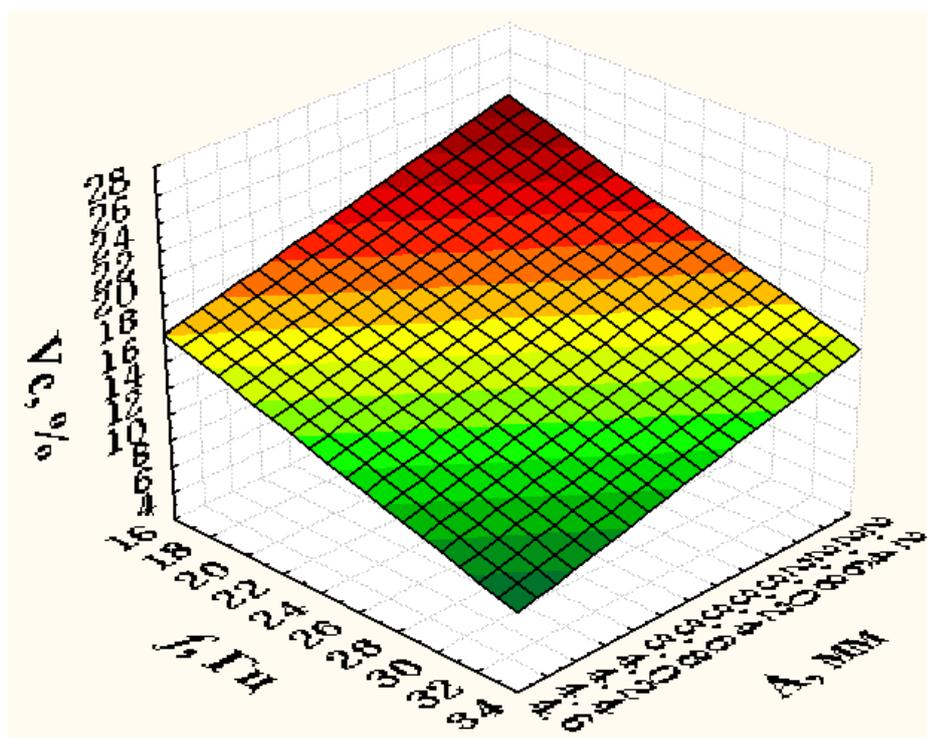


Рисунок 4.3 - Графическая зависимость коэффициента неоднородности (V_c) от частоты (f) и амплитуды (A) колебаний

На рисунке 4.3 заметно, что при частоте $f=30$ Гц и амплитуде колебаний $A = 4,2$ мм выходит готовая мучная сыпучая смесь наивысшего качества ($V_c = 6,9\%$).

Уравнение регрессии имеет вид:

$$V_c = 32,026 - 2,778 \cdot A - 0,45 \cdot f \quad (4.3)$$

Из уравнения (4.3) следует, что в большей степени на коэффициент неоднородности V_c оказывает влияние амплитуда колебаний A .

Для изучения влияния всех технологических параметров работы конструкции базового СНД на качество готовой смеси 1 воспользуемся модулем «Общие регрессионные модели». Параметры качества подобранной регрессионной модели отображены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 - Краткие сведения регрессионного анализа

R	0,835
R^2	0,697
R^2	0,658
F	17,639
p	0
<i>Std.Err</i>	3,196

Так как коэффициент множественной корреляции ($R=0,835$) стремится к единице, то это означает, что выходная переменная (V_c) сильно зависит от входных (β , A , f). Также, судя по величине коэффициента детерминации ($R^2=0,69704$) данная регрессия объясняет около 69,7% разброса значений входной переменной относительно среднего. Построенная регрессия высоко значима ($p=0$).

Кроме того, высокий показатель критерия Фишера ($F=17,639$) говорит об адекватности полученной регрессионной модели [45].

Результаты множественной регрессии, которые включают B (нестандартные коэффициенты), $Beta$ (стандартные коэффициенты), $Std.Err.Beta$ и $Std.Err.B$ (стандартные ошибки), $p-level$ (уровни значимости), t (критерий для проверки гипотезы о равенстве 0 свободного члена регрессии), представлены в таблице 4.15 [16, 28, 94, 129].

Таблица 4.15 - Результаты множественной регрессии

	Beta	Std. Err.	B	Std. Err.	t(23)	p-level
Свободный член			24,607	3,791	6,491	0,000001
X1(переменная β)	0,438	0,115	0,192	0,050	3,815	0,000889
X2 (переменная A)	-0,423	0,115	-2,778	0,753	-3,688	0,001218
X3 (переменная f)	-0,571	0,115	-0,450	0,094	-4,976	0,000049

Из таблицы 4.15 заметно, что все рассматриваемые коэффициенты имеют высокую статистическую значимость, так как $p\text{-level} = 0$.

Уравнение регрессии, которое подробно описывает влияние всех трех технологических параметров работы базового СНД, имеет следующий вид:

$$V_c = 24,604 + 0,192\beta - 2,778A - 0,45f \quad (4.4)$$

Из уравнения (4.4) следует, что наименьшее влияние на качество готовой мучной сыпучей смеси оказывают переменные f и β , а наибольшее - переменная A . Для проверки адекватности уравнения (4.4) воспользуемся относительной погрешностью (Δ), которая рассчитывается по формуле:

$$\Delta = \frac{|V_c^{\text{набл}} - V_c^{\text{мод}}|}{V_c^{\text{мод}}} \times 100\% \quad (4.5)$$

где $V_c^{\text{набл}}$ – наблюдаемые значения коэффициента неоднородности, %;

$V_c^{\text{мод}}$ – модельные значения коэффициента неоднородности, %.

В таблице 4.16 представлено сравнение наблюдаемых и модельных значений.

Таблица 4.16 - Сравнение наблюдаемых и модельных значений

№	Наблюдаемые Vc,%	Модельные Vc,%	Относительная погрешность Δ, %
1	20,87	18,72	11,50
2	25,46	24,48	4,00
3	18,89	21,46	11,99
4	15,04	14,03	7,19
5	21,54	18,78	13,84
6	12,83	13,91	7,76
7	20,22	18,81	7,49
8	22,4	21,70	3,23
9	16,88	18,68	9,66
10	13,64	12,01	13,57
11	19,49	16,71	16,60
12	10,83	12,83	15,58
13	7,07	6,39	10,64
14	16,05	14,16	13,34
15	4	5,87	31,85
16	11,4	10,18	11,98
17	16,75	15,94	5,08
18	7,43	8,06	7,81
19	15,79	14,97	5,48
20	21,19	20,73	2,22
21	14,24	15,65	9,01
22	9,98	9,41	6,06
23	17,42	16,97	2,65
24	6,47	7,09	8,74
25	12,68	12,19	4,02
26	18,12	17,95	0,95
27	9,78	10,87	10,02

Из таблицы 4.16 видно, что среднее значение относительной погрешности равняется 9,3%, так как допускается погрешность $\Delta \pm 10\%$, то полученной регрессионной моделью можно пользоваться для предсказания качества готовой мучной сыпучей смеси [108].

В результате наивысшее качество готовой мучной сыпучей смеси ($Vc=5,87\%$) достигается при следующих рациональных технологических

параметрах работы базового вибрационного СНД: $A=4,5$ мм, $f=33,33$ Гц, $\beta=45^\circ$. Выявлено, что на V_c в большей степени оказывает влияние амплитуда колебаний, а в наименьшей - частота и угол колебаний. Выходит, что для получения мучных сыпучих смесей хорошего качества необходимо воздействовать именно на амплитуду колебаний, так как она имеет наиболее высокий уровень значимости.

Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности от технологических параметров представлены в Приложении Д.

Аналогичным образом был проведен ПФЭ для конструкции вибрационного СНД с рецикл каналом. В качестве исследуемых были взяты две, подобранные в разделе 3.5.3, смеси.

Общее соотношение смешиваемых компонентов мучных сыпучих смесей – 1:200. Осуществлялось деление фонового компонента на 3 части: шнековый дозатор подавал одну часть фонового компонента, одновременно с порционным дозатором, подающим ключевой компонент, на лоток дополнительного рабочего органа аппарата; вторая и третья части подавались также шнековым дозатором на второй и третий витки основного рабочего органа, соответственно.

На качество готовой мучной сыпучей смеси оказывают влияние различные факторы, шаги и интервалы варьирования которых представлены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 - Шаги и интервалы варьирования факторов, оказывающих влияние на качество готовой мучной сыпучей смеси

Уровень	Фактор и его обозначение		
	X_1 – доля ключевого компонента, d .	X_2 – амплитуда колебания, A , мм	X_3 – частота колебания, f , Гц
Нижний	0,04 (1:24)	2,5	33,33
Цент	0,12 (1:7,5)	3,5	25
Верхний	0,2 (1:5)	4,5	16,6
Интервал варьирования	0,08	1	8,33

Т.к. в предыдущем разделе установлено, что смеси наилучшего качества получаются при угле вибрации $\beta=45^\circ$, то в качестве параметра X_1 взяты значения доли ключевого компонента 0,04-0,2.

Полученное качество смешивания, которое оценивается с помощью коэффициента неоднородности V_c , а также варьируемые в натуральном и кодированном виде технологические параметры работы вибрационного СНД с рецикл каналом, представлены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 - Варьируемые параметры и значения коэффициента неоднородности V_c

В кодированном виде			В натуральном виде			Коэффициент неоднородности $V_c, \%$	
X1	X2	X3	d	$A, \text{мм}$	$f, \text{Гц}$	Смесь 1	Смесь 2
						$V_c, \%$	$V_c, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8
-1	-1	-1	0,2	2,5	16,67	21,41	21,66
1	-1	-1	0,04	2,5	16,67	26,34	27,59
0	-1	-1	0,12	2,5	16,67	19,09	20,35
-1	1	-1	0,2	4,5	16,67	14,87	16
1	1	-1	0,04	4,5	16,67	21,78	22,99
0	1	-1	0,12	4,5	16,67	12,6	13,79
-1	0	-1	0,2	3,5	16,67	19,51	20,63
1	0	-1	0,04	3,5	16,67	22,87	24,04
0	0	-1	0,12	3,5	16,67	16,91	17,75
-1	-1	1	0,2	2,5	33,33	15,39	16,68
1	-1	1	0,04	2,5	33,33	21,39	22,67
0	-1	1	0,12	2,5	33,33	12,16	14,46
-1	1	1	0,2	4,5	33,33	7,53	8,68

1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	0,04	4,5	33,33	17,8	19,06
0	1	1	0,12	4,5	33,33	6,39	6,72
-1	0	1	0,2	3,5	33,33	12,33	13,57
1	0	1	0,04	3,5	33,33	18,28	19,51
0	0	1	0,12	3,5	33,33	8,01	9,26
-1	-1	0	0,2	2,5	25	17,27	18,45
1	-1	0	0,04	2,5	25	22,64	23,78
0	-1	0	0,12	2,5	25	14,93	16,09
-1	1	0	0,2	4,5	25	10,19	11,51
1	1	0	0,04	4,5	25	18,46	19,61
0	1	0	0,12	4,5	25	6,76	8,69
-1	0	0	0,2	3,5	25	13,2	14,49
1	0	0	0,04	3,5	25	19,41	20,68
0	0	0	0,12	3,5	25	10,17	11,44

Из таблицы 4.18 можно увидеть, что в вибрационном СНД с рецикл каналом, осуществляющим работу при доле ключевого компонента равной 0,12, частоте $f = 33,33$ Гц и амплитуде колебаний $A = 4,5$ мм, получают мучные сыпучие смеси хорошего качества (для смеси 1 - $V_c = 6,39\%$, для смеси 2 - $V_c = 6,72\%$). Смеси наихудшего качества ($V_c = 26,34\%$ для смеси 1 и $V_c = 27,59\%$ для смеси 2), получают при следующих технологических параметрах работы аппарата: доля ключевого компонента 0,04, частота $f = 16,67$ Гц и амплитуда колебаний $A = 2,5$ мм. Из этого следует, чем выше амплитуда A и частота колебаний, тем выше показатель качества итоговой мучной сыпучей смеси.

Обработка экспериментальных данных осуществлялась в программе «Statistica» [26, 163]. Графические зависимости коэффициента неоднородности от основных технологических параметров для смеси №1, полученной в СНД с рецикл каналом, представлены на рисунках 4.4-4.6.

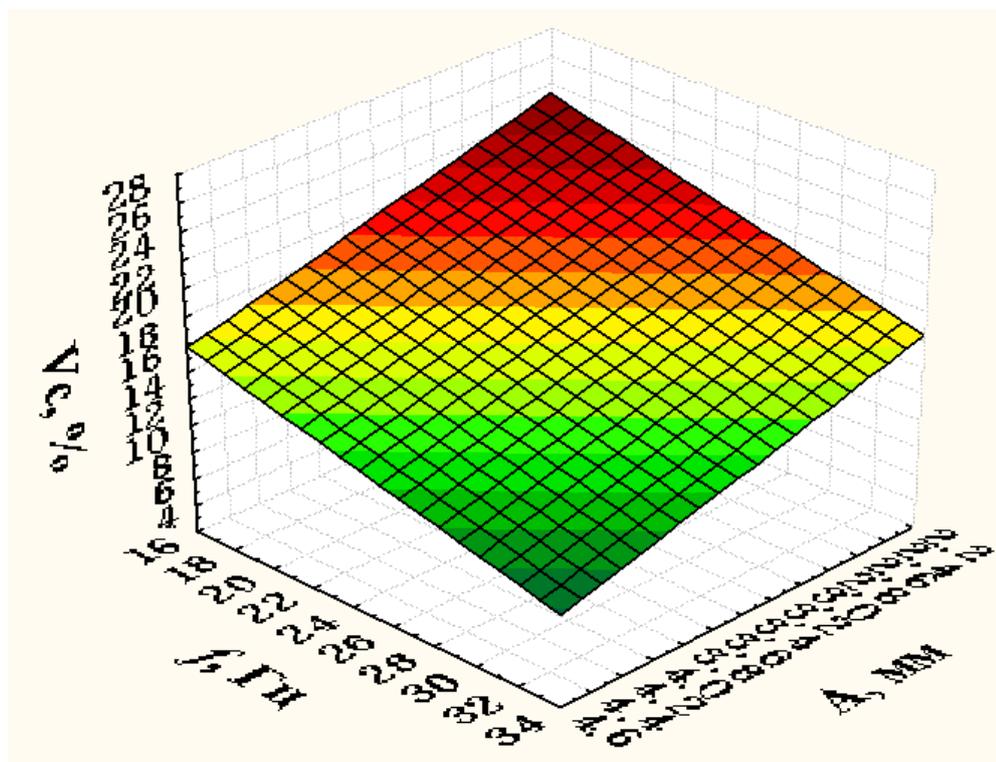


Рисунок 4.4 - Графическая зависимость коэффициента неоднородности (V_c) от частоты (f) и амплитуды (A) колебаний

Из рисунка 4.4 следует, что при частоте $f=34$ Гц и амплитуде колебаний $A = 4,4$ мм выходит готовая мучная сыпучая смесь наивысшего качества ($V_c = 9,45\%$).

Уравнение регрессии имеет вид:

$$V_c = 36,344 - 3,13 \cdot A - 0,386 \cdot f \quad (4.6)$$

Из уравнения (4.6) видно, коэффициент неоднородности V_c больше зависит от амплитуды колебаний A .

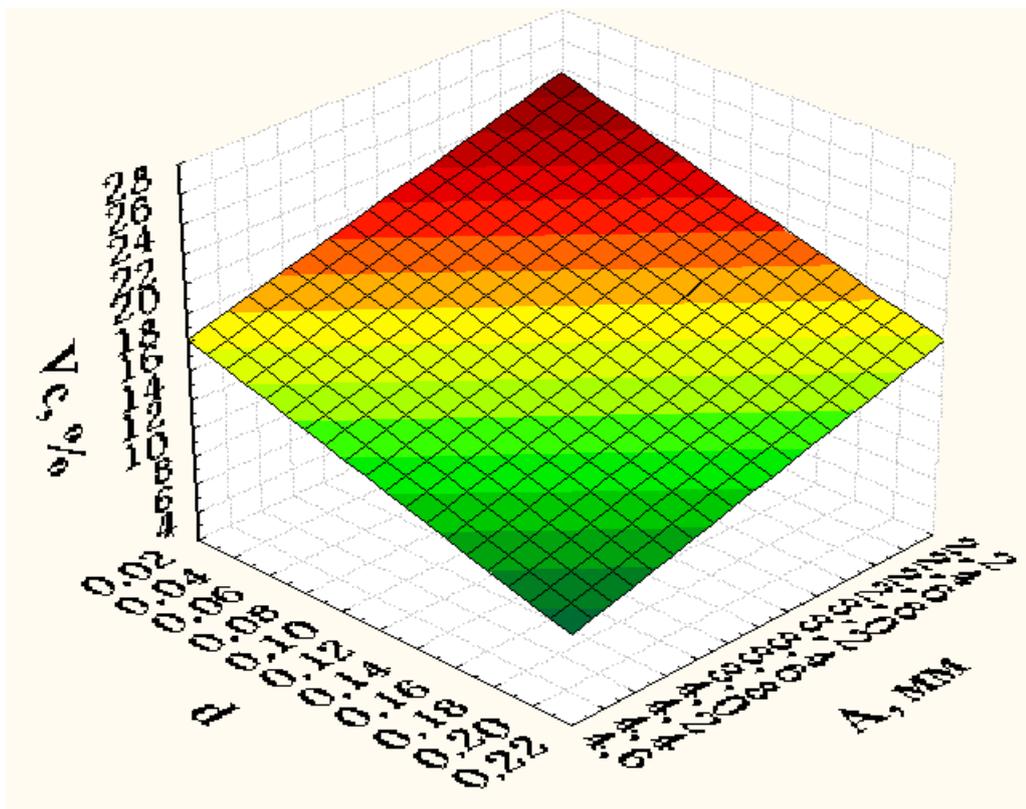


Рисунок 4.5 – Графическая зависимость коэффициента неоднородности (V_c) от амплитуды колебаний (A) и доли ключевого компонента (d)

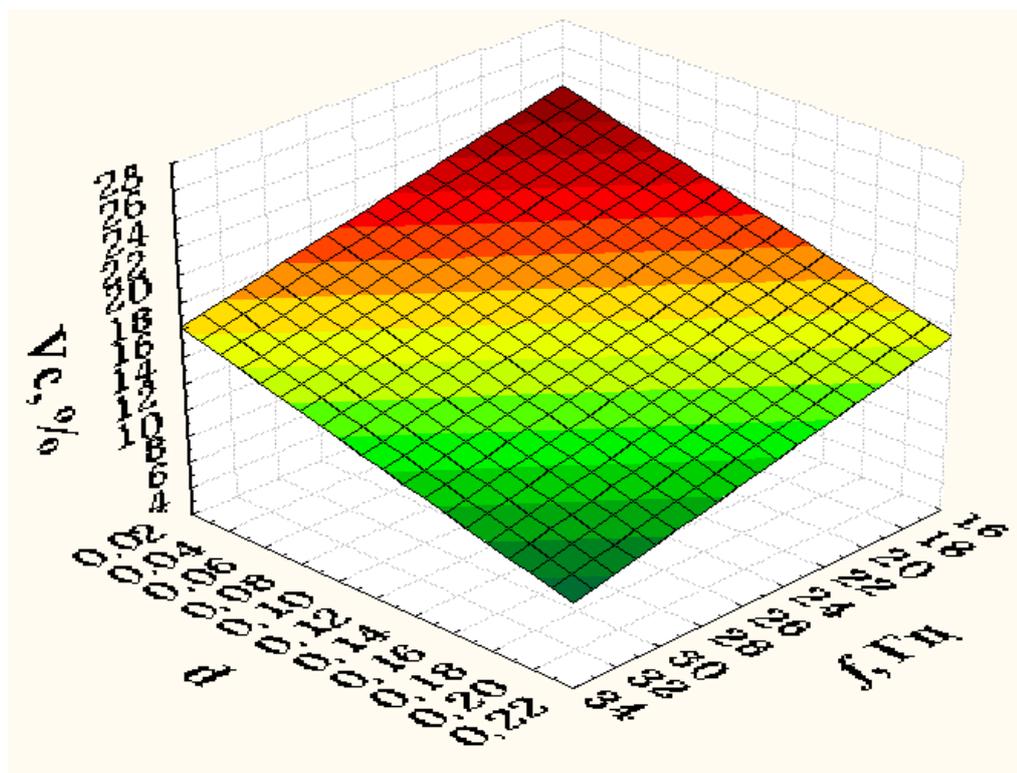


Рисунок 4.6 – Графическая зависимость коэффициента неоднородности (V_c) от частоты колебаний (f) и доли ключевого компонента (d)

На рисунке 4.5 видно, что в новом вибрационном СНД при работе со следующими технологическими параметрами: амплитуда колебаний $A = 4,4$ мм и доля ключевого компонента $d = 0,18$ из аппарата выходит готовая мучная сыпучая смесь наивысшего качества ($V_c = 7,8\%$).

Из рисунка 4.6 следует, что при частоте колебаний $f = 34$ Гц и соотношении компонентов $d = 0,18$ выходит готовая смесь наивысшего качества ($V_c = 8,9\%$).

Уравнения регрессий, которые описывают зависимости, представленные на рисунках 4.5 и 4.6, соответственно:

$$V_c = 29,062 - 39,632 \cdot d - 3,13 \cdot A \quad (4.7) \quad V_c = 29,217 - 39,632 \cdot d - 0,386 \cdot f \quad (4.8)$$

Из уравнений (4.7, 4.8) ясно, что наибольшее влияние на коэффициент неоднородности V_c оказывает доля ключевого компонента d , а наименьшее – амплитуда A и частота колебаний f .

Графические зависимости коэффициента неоднородности от основных технологических параметров для смеси №2, представлены на рисунках 4.7-4.9.

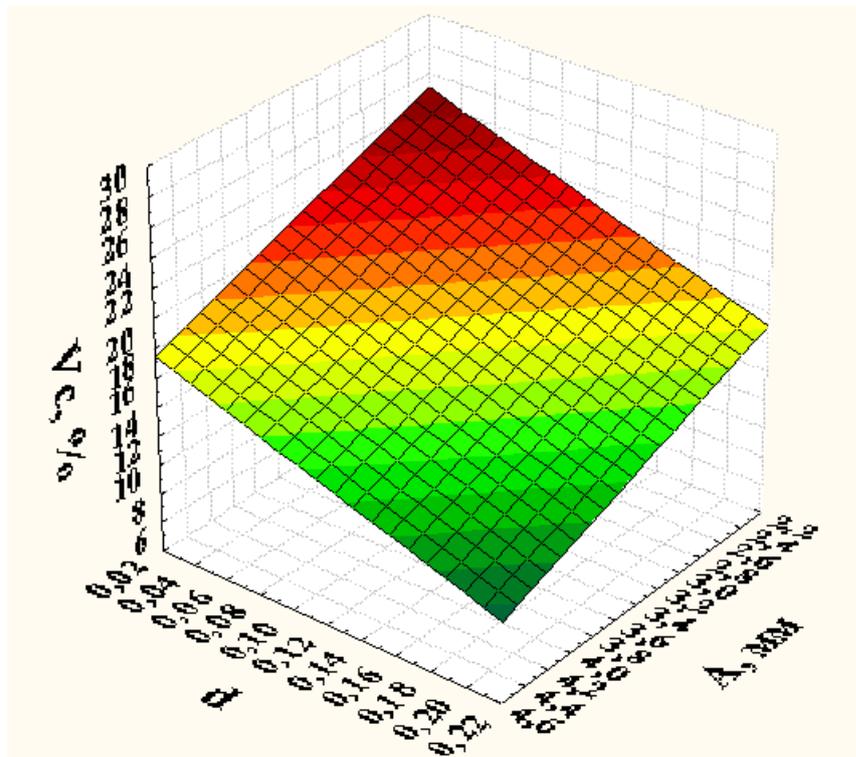


Рисунок 4.7 - Графическая зависимость коэффициента неоднородности (V_c) от амплитуды колебаний (A) и доли ключевого компонента (d)

На рисунке 4.7 заметно, что мучная сыпучая смесь наилучшего качества ($V_c = 6,6\%$) получается при амплитуде колебаний $A = 4,6$ мм и доле ключевого компонента $d = 0,18$. Уравнение регрессии имеет вид:

$$V_c = 28,301 - 39,764 \cdot d - 3,154 \cdot A \quad (4.9)$$

Из уравнения (4.9) можно увидеть, что, в сравнении с амплитудой колебаний A , доля ключевого компонента d оказывает гораздо большее влияние на коэффициент неоднородности V_c .

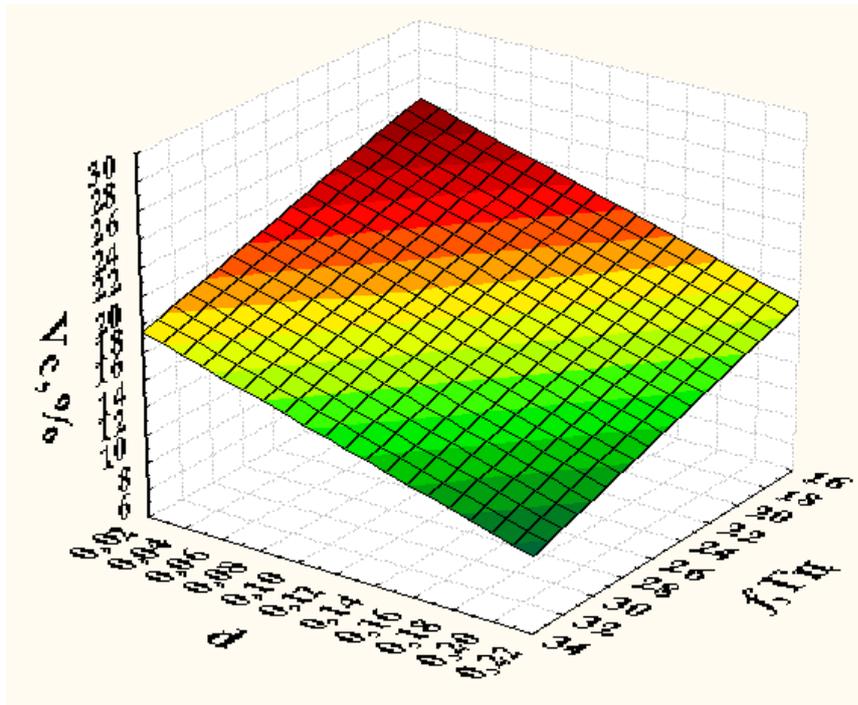


Рисунок 4.8 - Графическая зависимость коэффициента неоднородности (V_c) от частоты колебаний (f) и доли ключевого компонента (d)

На рисунке 4.8 видно, что при соотношении компонентов $d = 0,18$ и частоте колебаний $f = 34$ Гц на выходе из аппарата получается готовая мучная сыпучая смесь хорошего качества ($V_c = 7,4\%$). Уравнение регрессии имеет вид:

$$V_c = 27,579 - 39,764 \cdot d - 0,382 \cdot f \quad (4.10)$$

Из уравнения (4.10) заметно, что наибольшее влияние на коэффициент неоднородности V_c оказывает доля ключевого компонента d , а наименьшее - частота колебаний f .

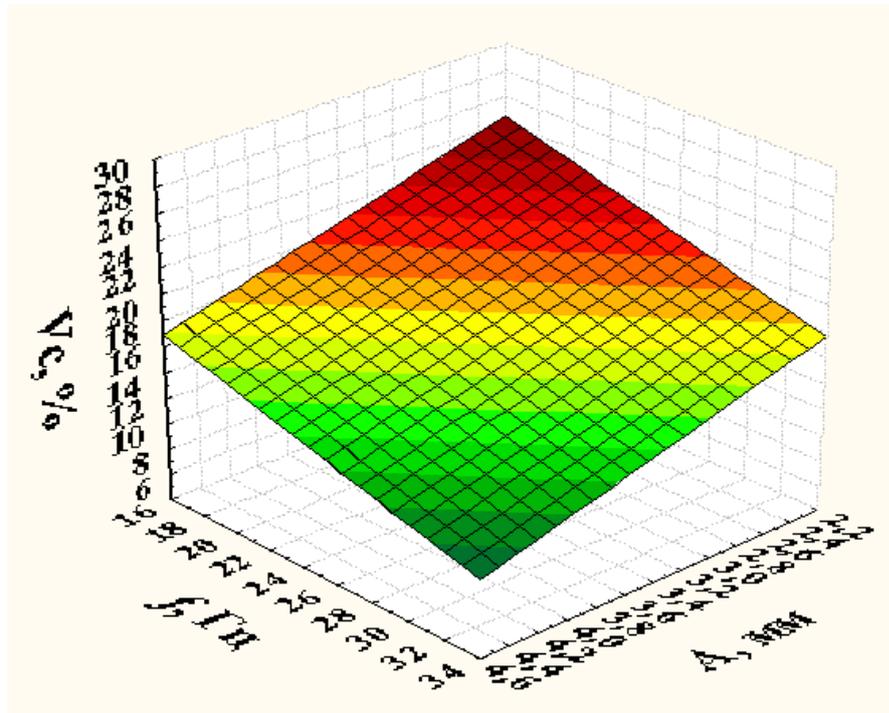


Рисунок 4.9 - Графическая зависимость коэффициента неоднородности (V_c) от частоты (f) и амплитуды (A) колебаний

На рисунке 4.9 заметно, что при частоте $f = 34$ Гц и амплитуде колебаний $A = 4,4$ мм выходит высококачественная готовая мучная сыпучая смесь ($V_c = 4\%$).

Уравнение регрессии имеет вид:

$$V_c = 30,866 - 3,154 \cdot A - 0,382 \cdot f \quad (4.11)$$

Из уравнения (4.11) видно, что наибольшее влияние на коэффициент неоднородности V_c оказывает амплитуда колебаний A .

Для изучения влияния всех трех технологических параметров работы конструкции вибрационного СНД с рецикл каналом на качество готовых смесей 1, 2 воспользуемся модулем «Общие регрессионные модели». Параметры качества подобранных регрессионных моделей отображены в таблице 4.19-4.20.

Таблица 4.19 - Краткие сведения регрессионного анализа для смеси 1

R	0,828
R ²	0,797
F	13,471
p	0
Std.Err	3,814

Таблица 4.20 - Краткие сведения регрессионного анализа для смеси 2

R	0,896
R ²	0,803
F	15,363
p	0
Std.Err	3,979

Так как коэффициенты множественной корреляции ($R=0,882$ и $R=0,896$) стремятся к единице, то это означает, что выходная переменная (Vc) сильно зависит от входных (β , A , f). Также, судя по величине коэффициентов детерминации ($R^2=0,797$ и $R^2=0,803$) данная регрессия объясняет около 80% разброса значений входной переменной относительно среднего. Критерий Фишера имеет достаточно существенные значения ($F=13,47$ и $F=15,36$) чтобы утверждать об адекватности полученных регрессионных моделей. Построенная регрессия высоко значима ($p=0$) [48].

Результаты множественной регрессии для мучных сыпучих смесей №1 и №2 отображены в таблицах 4.21-4.22.

Таблица 4.21 - Результаты множественной регрессии для смеси №1

	Beta	Std. Err.	B	Std. Err.	t(23)	p-level
Свободный член			41,099	3,99	10,302	0,000000
X1 (переменная β)	-0,471	0,121	-39,632	10,143	-3,907	0,000708
X2 (переменная A)	-0,465	0,121	-3,13	0,811	-3,857	0,000801
X3 (переменная f)	-0,477	0,121	-0,386	0,097	-3,957	0,000626

Таблица 4.22 - Результаты множественной регрессии для смеси №2

	Beta	Std. Err.	B	Std. Err.	t(23)	p-level
Свободный член			42,329	3,979	10,635	0,000000
X1 (переменная d)	-0,472	0,120	-39,763	10,118	-3,929	0,000669
X2 (переменная A)	-0,468	0,120	-3,154	0,809	-3,896	0,000726
X3 (переменная f)	-0,473	0,120	-0,382	0,097	-3,931	0,000666

Из таблиц 4.21-4.22 следует, что все рассматриваемые коэффициенты имеют высокую статистическую значимость, так как $p\text{-level} = 0$.

Уравнения регрессии, которые подробно описывают влияние всех технологических параметров работы СНД, имеют следующий вид

Для смеси №1:

$$V_c = 41,099 - 39,632d - 3,13A - 0,386f \quad (4.12)$$

Для смеси №2:

$$V_c = 42,329 - 39,764d - 3,154A - 0,382f \quad (4.13)$$

Из данных уравнений следует, что на качество готовой мучной сыпучей смеси наибольшее влияние оказывает переменная d , а наименьшее - переменные A и f . При этом значения всех технологических параметров отрицательные, это говорит о том, что чем они выше (в исследуемом диапазоне), тем ниже коэффициент неоднородности V_c , а, следовательно, и выше качество итоговых мучных сыпучих смесей.

Для проверки адекватности уравнений регрессии (4.12-4.13) воспользуемся относительной погрешностью (Δ). Сравнение наблюдаемых и модельных значений представлено в таблице 4.23.

Таблица 4.23 - Сравнение наблюдаемых и модельных значений

№	Vс,% Наблюдаемые		Vс,% Модельные		Относительная погрешность Δ, %	
	Смесь 1	Смесь 2	Смесь 1	Смесь 2	Смесь 1	Смесь 2
1	2	3	4	5	6	7
1	21,41	21,66	18,91	20,54	13,20	5,45
2	26,34	27,59	25,25	26,52	4,30	4,04
3	19,09	20,35	22,08	22,68	13,56	10,25
4	14,87	16	12,65	14,54	17,52	10,02
5	21,78	22,99	18,99	20,90	14,67	9,97
6	12,6	13,79	15,82	14,37	20,37	4,04
7	19,51	20,63	17,78	17,54	9,73	17,59
8	22,87	24,04	22,12	23,37	3,37	2,89
9	16,61	17,75	18,95	19,52	10,78	9,07
10	15,39	16,68	14,48	15,21	6,28	9,66
11	21,39	22,67	18,82	21,18	13,64	7,03
12	12,16	14,46	14,65	16,34	17,00	11,51
13	7,53	8,68	6,72	8,21	12,05	5,70
14	17,8	19,06	16,68	17,58	6,71	8,42
15	6,39	6,72	9,39	10,49	31,95	35,94
16	12,33	13,57	11,35	12,21	8,63	11,14
17	18,28	19,51	16,69	17,57	3,54	11,02
18	8,01	9,26	9,00	12,83	11,00	27,82
19	17,27	18,45	15,70	17,38	10,02	6,17
20	22,64	23,78	22,04	23,35	2,73	1,82
21	14,93	16,09	15,87	19,32	5,92	16,70
22	10,19	11,51	9,44	11,38	7,97	1,17
23	18,46	19,61	17,78	17,74	3,82	10,54
24	6,76	8,69	7,16	10,01	5,59	13,19

1	2	3	4	5	6	7
25	13,2	14,49	12,57	14,38	5,03	0,78
26	19,41	20,68	18,91	20,20	2,65	2,37
27	10,17	11,44	10,29	12,64	1,17	9,49

Из таблицы 4.23 можно заметить, что среднее значение относительной погрешности для смеси 1 составляет 9,7%, а для смеси 2 - 9,8%, так как допустимое значение Δ составляет $\pm 10\%$, то полученные регрессионные модели можно использовать для предсказания качества получаемой мучной сыпучей смеси [108].

Обнаружено, что на V_c при получении мучных сыпучих смесей наиболее ощутимое влияние оказывает соотношение компонентов d , а в наименьшее - частота (в диапазоне $f=25; \dots; 33,3$ Гц) и амплитуда колебаний (в диапазоне $A=4; \dots; 4,5$ мм). Так как на предприятиях, как правило, соотношение компонентов по рецептуре неизменно, то для получения высококачественных мучных сыпучих смесей необходимо направить действие именно на амплитуду A и частоту f колебаний, которые имеют высокий уровень значимости [95].

Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров для вибросмесителя с рецикл каналом представлены в Приложении Е.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Анализ результатов исследования по определению влияния технологических параметров на скорость вибротранспортирования мучной сыпучей смеси υ показал, что она возрастает с увеличением частоты f и амплитуды A колебаний рабочего органа. Наибольшие показатели скорости вибротранспортирования наблюдаются при $f=33,3$ Гц и $A=4,5$ мм.

2. Результаты исследований пропускной способности отверстий показали, что она возрастает при увеличением амплитуды колебаний A и высоты ВКС. Наибольшая пропускная способность наблюдается при $A=4,5$ мм и ВКС=40 мм.

3. При определении взаимного влияния технологических параметров смесителя на потребляемую мощность выяснилось, что при возрастании амплитуды A и частоты колебаний f , наблюдалось увеличение её значений. Наибольшие показатели потребляемой мощности наблюдались при $f=33,3$ Гц и $A=4,5$ мм.

4. В результате регрессионного анализа было установлено, что на коэффициент неоднородности V_c при получении мучных сыпучих смесей наибольшее влияние оказывает соотношение компонентов d , а наименьшее - частота (в диапазоне $f=25; \dots; 33,3$ Гц) и амплитуда колебаний (в диапазоне $A=4; \dots; 4,5$ мм). Для получения в вибрационном СНД с рецикл каналом мучной сыпучей смеси высокого качества, при соотношении компонентов 1:7,5, высоте виброкипящего слоя 20 мм и диаметре перфорации рабочего органа 7 мм, необходимо использовать следующие технологические параметры работы: угол вибрации 45° с амплитудой колебания дебалансов 4,5 мм на рабочей частоте колебания дебалансов 33,33 Гц.

ГЛАВА 5. ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В пятой главе приведено описание практического применения результатов данной диссертации. Проведена апробация вибросмесителя с рецикл каналом, реализующего метод «последовательного разбавления», с целью получения мучных сыпучих смесей на базе ООО «Кузбассхлеб» и ФГАНУ «Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности».

5.1 Технологическая линия производства мучных сыпучих смесей.

Опытно-промышленные испытания

Многие кондитеры достаточно давно работают с готовыми мучными сыпучими смесями, так как они обладают следующими преимуществами:

1. Скорость. Приготовление продукта из полуфабриката занимает намного меньше времени, чем при производстве по классической технологии.

2. Простота приготовления. Все компоненты дозируются и смешиваются одновременно, исключая приготовление по фазам полуфабриката. Это значительно облегчает производственный процесс.

3. Экономия. При приготовлении конечного продукта экономятся электроэнергия, производственные площади, трудозатраты.

4. Качество. Полученный полуфабрикат отличается равномерным соотношением ингредиентов по всей смеси.

Данные преимущества доказывают о необходимости разработки аппаратов, способных производить качественные мучные сыпучие смеси. В связи с этим и был разработан вибрационный смеситель непрерывного действия с рецикл каналом, реализующий метод «последовательного разбавления», для получения мучных сыпучих смесей.

Далее проводились опытно-промышленные испытания вибросмесителя с рецикл каналом на технологических линиях процесса непрерывного смешивания подобранных мучных сыпучих смесей на базе ООО «Кузбассхлеб» и ФГАНУ

НИИХП. Помимо вибрационного смесителя, технологические линии включали в свой состав дозаторы (шнековые, объемный и порционный) и ленточные конвейеры. Технологическая линия схематически изображена на рисунке 5.1.

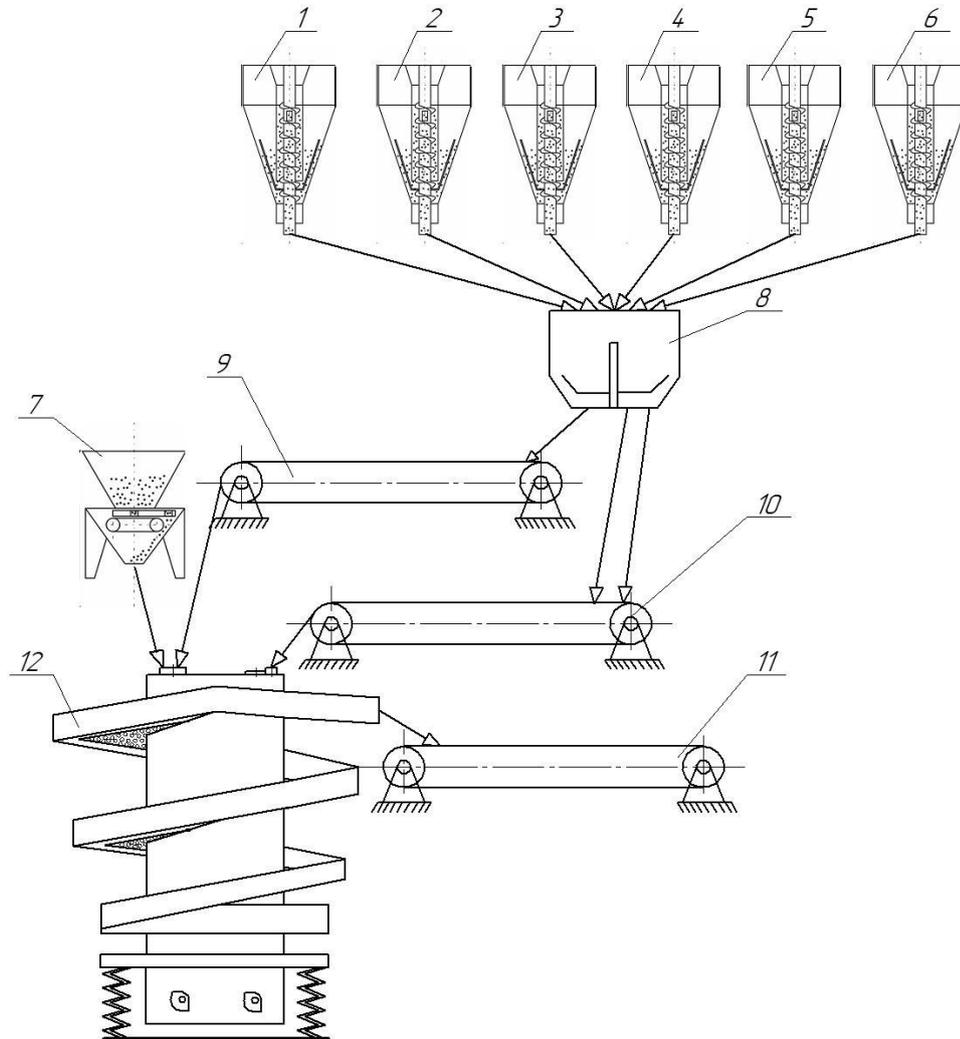


Рисунок 5.1 - Технологическая схема производства мучных сыпучих смесей
(1, 2, 3, 4, 5, 6 - шнековые дозаторы; 7 – порционный дозатор; 8 – бункер с мешалкой,
9-11 – ленточные конвейеры; 12 –вибрационный СНД с рецикл каналом)

Данные опытно-промышленные испытания проводились для определения рациональности использования мучных сыпучих смесей, полученных в вибрационном СНД с рецикл каналом.

Испытания включали:

- обработку на холостом ходу;
- проверку работоспособности под нагрузкой;

- определения качества получаемой мучной хлебопекарной смеси при различных количествах витков рабочего органа, отверстий на витках рабочего органа;

- замеры уровней вибрации и шума.

Время проведения испытаний составляло 2 часа. При исследовании работы вибрационного СНД с рецикл каналом на холостом ходу установлено:

1) Температура сальниковых и подшипниковых узлов находилась в норме (не превышала 40°С).

2) Средства автоматизации и электроснабжения работали без отказов.

3) Уровень вибрации и шума находились в пределах нормы. Выбросов пыли в окружающую среду не обнаружено.

Производительность смесителя составила 200 кг/ч. Удельные энергозатраты – 687 - 679 Дж/кг.

Качество смешивания определялось по методике, представленной в разделе 3.5.3. Усредненные результаты коэффициента неоднородности, полученные на исследуемом вибрационном СНД для производства мучной сыпучей смеси 1, приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Сравнение коэффициента неоднородности

№ повтора	Коэффициент неоднородности ключевого компонента V_c , %	
	ФГАНУ НИИХП	ООО «Кузбассхлеб»
1	7,23	10,4
2	6,98	5,79
3	10,3	9,5
4	8,43	7,34
5	5,72	6,27
6	2,49	6,68
Среднее значение	6,86	7,66

Из таблицы 5.1 можно увидеть, что среднее значение коэффициента неоднородности составило 6,86% для испытаний, проводимый на базе ФГАНУ

НИИХП и 7,66% для испытаний, проводимых на базе ООО «Кузбассхлеб». Это является вполне правомерным для признания полученной мучной сыпучей смеси хорошего качества [108].

Акты опытно-промышленных испытаний разработанного вибрационного смесителя с рецикл каналом представлены в Приложениях Ж, И.

5.2. Аминокислотный скор хлебобулочного изделия

В связи с тем, что рецептура смеси №1 включает в свой состав компоненты с высоким содержанием белка, нами был проведен анализ количества белка в контрольном хлебе, изготовленном по ГОСТ 28808-90 [46], и хлебе, изготовленном из подобранной смеси. В результате проведенного исследования массовая доля белка составила 10,16%. При учете пищевой ценности любого продукта необходимо также учитывать его качественный состав (содержание в белке незаменимых аминокислот) [24, 43, 83, 89, 116]. Поэтому были изготовлены пробные образцы хлеба из смеси №1, которая получена при выявленных оптимальных технологических параметрах работы оригинального вибрационного смесителя, и изучена его биологическая ценность. Мучная сыпучая смесь 1 представлена на рисунке 5.2. Образец выпеченного хлеба из исследуемой смеси №1 представлен на рисунке 5.3.



Рисунок 5.2 – Мучная сыпучая смесь №1



Рисунок 5.3 – Образец выпеченного хлеба из мучной сыпучей смеси №1

Аминокислотный состав и скор контрольного хлеба и хлеба из мучной смеси №1 представлены в таблице 5.2. Сравнительный аминокислотный анализ представлен на рисунке 5.4.

Таблица 5.2 - Аминокислотный состав контрольного хлеба и хлеба из мучной смеси №1

Наименование аминокислот	Контрольный хлеб		Хлеб из смеси №1	
	Количество аминокислоты в 1 г белка, мг	Аминокислотный скор, %	Количество аминокислоты в 1 г белка, мг	Аминокислотный скор, %
Изолейцин	42,5	106,2	62,0	155,0
Лейцин	77,9	111,3	108,3	154,7
Валин	46,1	92,2	62,0	124,0
Лизин	26,5	48,2	46,2	84,0
Метионин+ цистин	34,0	97,1	24,6	70,3
Фенилаланин+ Тирозин	73,6	122,7	85,6	142,7
Треонин	31,1	77,7	50,2	125,5
Триптофан	9,8	98,0	15,7	157,0
Сумма НАК	341,5		454,6	

Значение сора лимитирующей аминокислоты и определяет биологическую ценность белка. Лимитирующей является аминокислота скор которой наименьший. Лимитирующими аминокислотами в образце контрольного хлеба являются валин, лизин, метионин+цистин, треонин и триптофан, а в образце хлеба из мучной смеси №1 - лизин и метионин+цистин.

По сравнению с контрольным образцом в хлебе, приготовленном из мучной смеси №1, аминокислотный скор изолейцина увеличился на 46,0%, лейцина – на 39,0%, валина – на 34,0%, лизина – на 74%, фенилаланина+тирозина – на 16,0%.

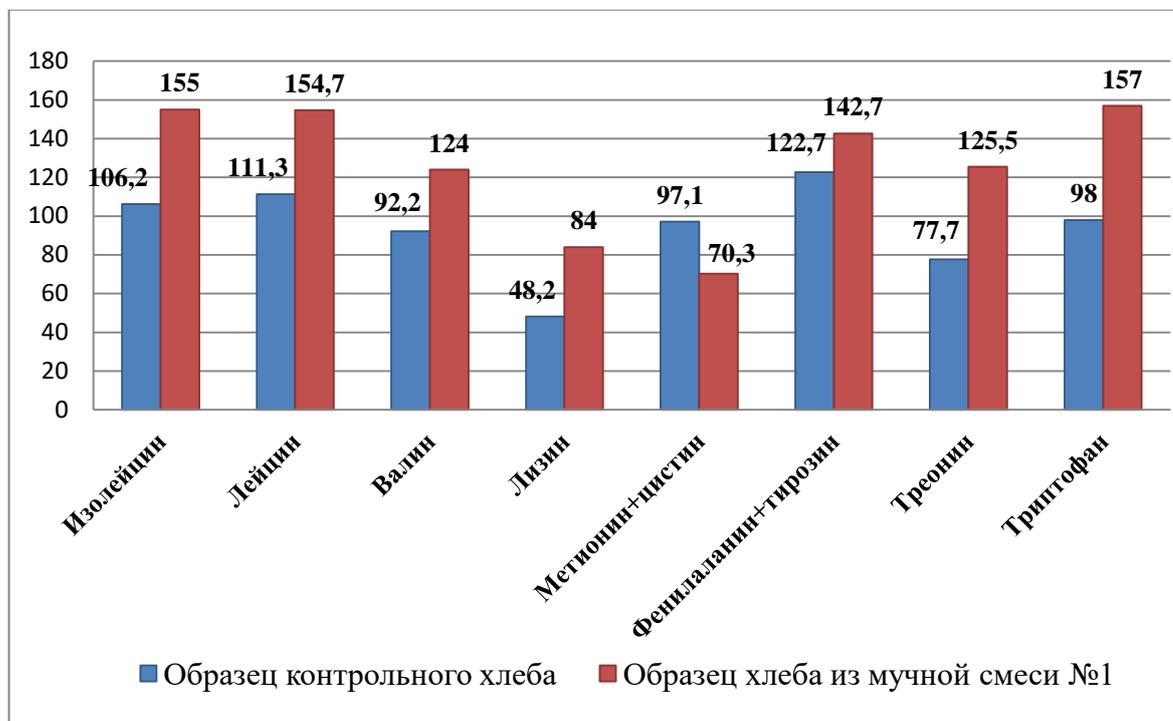


Рисунок 5.4 – Сравнительный аминокислотный анализ

Протокол испытаний образца хлеба из мучной сыпучей смеси № 1 представлен в Приложении К.

5.3 Экономический расчет

Экономическая эффективность - это соотношение между результатом деятельности и общими текущими затратами производства.

В данном разделе осуществлены расчеты объема производства и реализации продукции, стоимости материальных ресурсов, численности работников предприятия и фонда оплаты труда, себестоимости, прибыли и цены продукции [82].

Для определения экономического эффекта от продажи мучных хлебопекарных смесей №1 и №2, приготовленных на вибрационном СНД, реализующем метод «последовательного разбавления», произведен расчет исходя из его ориентировочной стоимости 600 тыс. руб. и срока службы 10 лет.

Фонд заработной платы на одного человека составит:

$$25\,000 \text{ руб.} \times 1 \text{ чел.} = 25\,000 \text{ руб.} \quad (5.1)$$

Расход электроэнергии на работу смесителя в месяц:

$$0,75 \text{ кВт} \times 23 \text{ рабочих дня} \times 8 \text{ ч.} = 138 \text{ кВт/ч} \quad (5.2)$$

Стоимость электроэнергии (на 1 декабря 2020 г. по Кемеровской области) равна:

$$3,59 \text{ руб.} \times 138 = 495,42 \text{ руб.} \quad (5.3)$$

Амортизационные отчисления от стоимости вибрационного СНД, реализующего метод «последовательного разбавления» в месяц:

$$600\,000 / (10 \text{ лет} \times 12 \text{ месяцев}) = 5000 \text{ руб.} \quad (5.4)$$

Непредвиденные расходы - 25000 руб., транспортные расходы - 15000 руб.

Производительность вибрационного смесителя:

$$200 \text{ кг/ч} \times 8 \text{ ч.} \times 23 \text{ р.д.} = 36800 \text{ кг/месяц} \quad (5.5)$$

Годовой объем производства будет составлять:

$$36800 \text{ кг} \times 12 \text{ мес.} = 441600 \text{ кг} \quad (5.6)$$

В итоге, затраты на производство смесей №1 и №2 составят:

$$(25000 + 495,42 + 5000 + 25000 + 15000) / 36800 = 1,92 \text{ руб./ кг} \quad (5.7)$$

Далее определили себестоимость сырья для приготовления мучных смесей, состоящую из суммы затрат на их производство и средней рыночной стоимости сырья (87 руб./кг):

$$87 + 1,92 = 88,92 \text{ руб./кг.} \quad (5.8)$$

Следовательно, годовая себестоимость составит:

$$88,92 \times 36800 \times 12 = 39265145 \text{ руб./год} \quad (5.9)$$

Чистая прибыль определялась как разница между годовой себестоимостью и операционными затратами:

$$39265145 - 70495,42 = 39194649,58 \text{ руб./год} \quad (5.10)$$

Тогда срок окупаемости вибрационного смесителя, реализующего метод «последовательного разбавления» для производства мучных смесей №1 и №2 составит:

$$600000 \text{ руб.} / 39194649,58 \text{ руб./год.} = 0,02 \text{ года} \quad (5.11)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО 5 ГЛАВЕ

1. Проведены опытно-промышленные испытания вибросмесителя с рецикл каналом, реализующего метод «последовательного разбавления», для получения мучных сыпучих смесей которые показали, что его конструкция, при установке рациональных технологических параметров работы, обеспечивает получение однородных высококачественных мучных сыпучих смесей.

2. Проведенный аминокислотный анализ показал, что в образце хлеба (454,6 мг/1 г белка) из мучной смеси 1, полученной на вибрационном СНД с рецикл каналом, в сравнении с образцом контрольного хлеба (341,5 мг/1 г белка) из смеси, полученной классическим способом, содержание аминокислот увеличилось на 33%. Это доказывает, что биологическая ценность продукта возросла.

3. Установлено, что себестоимость сырья для приготовления 1 килограмма мучной сыпучей смеси, составит 88,92 руб. В таком случае срок окупаемости смесительного оборудования при его стоимости 600000 рублей составит 0,02 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен литературно-патентный обзор, в результате которого выявлено, что для получения мучных сыпучих смесей заданного качества целесообразно использовать лотковые вертикальные подъемные СНД вибрационного типа.

2. На основе корреляционного анализа разработана математическая модель процесса непрерывного смешивания в вибрационном СНД с рецикл каналом, способным сглаживать флуктуации входящих материальных потоков (S варьируется в пределах $309 \div 1753$ единиц). Для получения в вибрационном СНД наиболее качественной мучной сыпучей смеси рекомендуется использовать схему с двухступенчатым разбавлением материального потока, с количеством витков $n=5$ или $n=6$ и коэффициентом рециркуляции $\alpha=0,7$.

3. Разработана конструкция вибрационного СНД с рецикл каналом (патент РФ 2626415), реализующая метод «последовательного разбавления», которая позволяет получать мучные сыпучие смеси заданного качества.

4. Определены рациональные технологические параметры работы вибрационного СНД с рецикл каналом для получения мучных сыпучих смесей высокого качества при соотношении компонентов 1:7,5, высоте виброкипящего слоя 20 мм и диаметре перфорации рабочего органа 7 мм: угол вибрации 45° с амплитудой колебания дебалансов 4,5 мм на рабочей частоте колебания дебалансов 33,33 Гц. В результате регрессионного анализа определено, что на коэффициент неоднородности V_c при получении мучных сыпучих смесей наибольшее влияние оказывает соотношение компонентов d , а наименьшее - частота (в диапазоне $f=25; \dots; 33,3$ Гц) и амплитуда колебаний (в диапазоне $A=4; \dots; 4,5$ мм).

5. Проведены успешные опытно-промышленные испытания вибрационного СНД с рецикл каналом на базе ООО «Кузбассхлеб» из которых следует, что смеситель обеспечивает получение мучных сыпучих смесей высокого качества ($V_c=5, \dots, 10\%$). Проведенный аминокислотный анализ показал, что биологическая ценность хлеба из мучной сыпучей смеси, полученной в разработанном вибрационном СНД, в сравнении с образцом контрольного хлеба из смеси, полученной классическим способом, возросла на 33%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1023204 СССР, МКИ G 01 F 13/00. Устройство для объемного дозирования [текст] / Г.С. Сулеин, В.Н. Иванец. – №3284342/18-10; заявл. 28.04.1981; опубл. 15.06.1983, Бюл. 22.
2. А.с. 1064144 СССР, МКИ G 01 F 13/00. Шнековый дозатор [текст] / В.Н. Иванец, А.А. Крохалев, Г.С. Сулеин и др. – №3521508/18-10; заявл. 11.11.1982; опубл. 30.12.1983, Бюл. 46.
3. А.с. 1105220 СССР, МКИ В 01 F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Сулеин Г.С. – №3451639/23-26; заявл. 11.06.1982; опубл. 30.07.1984, Бюл. 28.
4. А.с. 1115790 СССР, МКИ В 01 F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Курочкин А.С., Иванец В.Н., Крохалев А.А., Коршиков Ю.А. – №3567541/23-26; заявл. 25.03.1983 опубл. 30.09.1984, Бюл. 36.
5. А.с. 1456212 СССР, МКИ В 01 F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Каталымов А.В., Цетович А.Н., Тарутин А.Л., Ишков А.Д. - №3953738/31-26; заявл. 16.09.85; опубл. 07.02.1989, Бюл. 5.
6. А.с. 1472110 СССР, МКИ В 01 F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Сулеин Г.С., Иванец Г.Е. и др. – №4220681/31-26; заявл. 01.04.1987; опубл. 15.04.1989, Бюл. 14.
7. А.с. 1478048 СССР, МКИ В 01 F 11/00. Устройство для объемного дозирования [текст] / В.Н. Иванец, Г.С. Сулеин. – №4230012/24-10; заявл. 14.04.1987; опубл. 07.05.1989, Бюл. 17.
8. А.с. 1558449 СССР, МКИ В 01 F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Курочкин Л.С., Иванец Г.Е., Макаров Ю.И., Киришян В.О., Нерсесян Д.Г. – №4363148/31-26; заявл. 13.01.1988; опубл. 23.04.1990, Бюл. 15.
9. А.с. 1590128 СССР, МКИ В01F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Сулеин Г.С. - №4498954/23; заявл. 31.10.1988; опубл. 07.09.90, Бюл. № 33.
10. А.с. 1674943 СССР, МКИ³ В 01 F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Шушпанников А.Б., Иванец В.Н. (СССР). – № 4708129/13; заявл. 21.06.89; опубл. 07.09.1991, Бюл. 33.

11. А.с. 1716697 СССР, МКИ В 01 F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Шушпанников А.Б., Иванец В.Н., Пимаков А.Г. – №4685826/26; заявл. 03.05.1989; опубл. 1992.

12. А.с. 1793956 СССР, МКИ В 01 F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Шушпанников А.Б., Иванец В.Н. – № 4925829/26; заявл. 04.04.91; опубл. 07.02.1993, Бюл. 5.

13. А.с. 655419 СССР, МКИ В 01 F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Иванец В.Н., Плотников В.А. – №2551609/23-26; заявл. 07.12.1977; опубл. 05.04.1979, Бюл. 13.

14. А.с. 912251 СССР, МКИ В01F 11/00. Вибрационный смеситель для сыпучих материалов [текст] / Петько В.Ф., Братерский Ф.Д., Гамолич В.Я., Дударев И.И., Попченков П.К. - №2946019/23-26; заявл. 26.06.1980; опубл. 15.03.1982, Бюл. № 10.

15. А.с. 919720 СССР, МКИ В 01 F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Иванец В.Н., Плотников В.А., Еремин А.Т. –№2965558/23-26; заявл. 02.07.1980; опубл. 15.04.1982, Бюл. 14.

16. Анализ существующих и перспективных конструкций смесителей сыпучих компонентов / В.В. Матюшев, А.С. Аветисян, И.А. Чаплыгина, А.В. Семенов // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: материалы международной научно-практической конференции 23-27 апреля 2020 г. – Красноярск. - 2020. – С. 178-181.

17. Анализ функционирования центробежно-шнекового смесителя методом множественной регрессии при получении мучной хлебопекарной смеси для приготовления хлебобулочных изделий для питания спортсменов / Д.М. Бородулин, Е.В. Невская, Д.И. Киселев [и др.] // Техника и технология пищевых производств. - 2016. - Т. 41. - № 2. - С. 91-100.

18. Антипов, Е.В. Математическое моделирование и исследование систем непрерывного смесеприготовления: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.18: защищена 19.02.2004 / Антипов Евгений Васильевич. – КемТИПП: Кемерово, 2004. – 176 с.

19. Бабланов, С.Т. Центробежные лопастные смесители для получения двухкомпонентных смесей / С.Т. Бабланов, Р.И. Сержанов // Наука и техника Казахстана. – 2015. - № 1-2. – С. 17-21.

20. Багринцев, И.И. Смесительное оборудование для сыпучих и пастообразных материалов: Обзорная информация / И.И. Багринцев, Л.М. Лебедев, В.Я. Филин. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1986. – 35 с.

21. Баканов, М.В. Разработка и исследование непрерывно-действующего смесительного агрегата вибрационного типа для получения комбинированных продуктов питания: дисс. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / М.В. Баканов. – КемТИПП: Кемерово, 2001. – 224 с.

22. Бакин, И. А. Интенсификация процессов смешивания при получении комбинированных продуктов в аппаратах центробежного типа: дис....докт. техн. наук: 0.518.12 / Бакин И.А. – КемТИПП: Кемерово, 2009. - 320 с.

23. Бальмонт, Т.М. Разделение многокомпонентных смесей / Т.М. Бальмонт, П.П. Гуюмджян, Д.С. Бальмонт // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. - 2008. - Т. 10. - № 3. - С.55-59.

24. Богатырев, А. Н. Натуральные продукты питания – здоровье нации / А.Н. Богатырев, Н.С. Пряничникова, И.А. Макеева // Пищевая промышленность. – 2017. – № 8. – С. 26–29.

25. Бойко, И.Г. Интенсификация процесса смешивания сыпучих кормов / И.Г. Бойко // Экология и сельскохозяйственная техника: материалы 5-й международной научно-практической конференции 15–16 мая 2007 г. – Санкт-Петербург. – 2007. – Т.1. – С. 46-53.

26. Боровиков, В.П. Популярное введение в программу STATISTICA / В.П. Боровиков. - М.: Компьютер Пресс, 1998. - 267 с.

27. Бородулин, Д. М. Исследование новой конструкции центробежного смесителя на основе множественного регрессионного анализа / Д. М. Бородулин, Л. А. Войтикова // Современные материалы, техника и технология: материалы Международной научно - практической конференции. – Курск. - 2011. – С. 48-51.

28. Бородулин, Д.М. Исследование функционирования центробежного смесителя непрерывного действия методом множественного регрессионного анализа / Д.М. Бородулин, А.Б. Шушпанников, Л.А. Войтикова // Техника и технология пищевых производств. – 2012. - №1. – С. 98-103.

29. Бородулин, Д.М. Определение пропускной способности отверстия на вибрационном смесителе, реализующем метод «последовательного разбавления» / Д.М. Бородулин, Т.В. Зорина // Инновации в пищевой биотехнологии: сборник тезисов II Международного симпозиума. – Кемерово. - 2019. – Т.2. - С. 88-90.

30. Бородулин, Д.М. Повышение эффективности процесса смешивания при получении комбинированных продуктов в смесительных агрегатах центробежного типа: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.18.12 / Д.М. Бородулин. – КемТИПП: Кемерово, 2013. – 406 с.

31. Бородулин, Д.М. Прогнозирование сглаживающей способности центробежного смесителя на основе корреляционного анализа / Д.М. Бородулин, А.А. Андриюшков // Техника и технология пищевых производств. – 2009. - № 4. – С. 39-42.

32. Бородулин, Д.М. Развитие смесительного оборудования центробежного типа для получения сухих и увлажненных комбинированных продуктов: монография / Д.М. Бородулин, В.Н. Иванец. - КемТИПП: Кемерово, 2012. - 178 с.

33. Бородулин, Д.М. Разработка вибрационного смесителя для получения обогащенных мучных смесей / Д.М. Бородулин, Т.В. Зорина // Холодильная техника и биотехнологии: сборник тезисов I Национальная конференция. – Кемерово. - 2019. – С. 22-25.

34. Бунин, М. В. Вопросы теории процессов смесеобразования / М.В. Бунин.– Тр./Харьк. автодор. ин-т, 1962. - Вып. 28. - С. 86–95.

35. Венецкий, И.А. Корреляционный анализ и его применение в статистических исследованиях / И.А. Венецкий // Проблемы статистики. – 1981. - № 7. – С. 40-47.

36. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерное приложение / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчарова. – М.: Наука, 1988. – 480 с.

37. Видинеев, Ю.Д. Дозаторы непрерывного действия / Ю.Д. Видинеев. – М.: Энергия, 1981. – 273 с.

38. Видинеев, Ю.Д. Современные методы оценки качества непрерывного дозирования / Ю.Д. Видинеев // Журнал Всесоюз. хим. общества им. Д.И. Менделеева. – 1988. - Т.33. - № 4 – С. 397-404.

39. Власова, О. В. Обзор и анализ вибрационных устройств для смешивания сыпучих кормов / О. В. Власова, Н. В. Гучева // Молодой исследователь Дона. – 2017. – Т. 8. - № 5. – С. 30–36.

40. Воронов, А. А. Теория автоматического управления: учебник для вузов по специальности «Автоматика и телемеханика». Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления [текст] / А. А. Воронов, Н. А. Бабаков, А.А. Воронова [и др.] // Под ред. А.А. Воронова. - М.: Высшая школа, 1986. – 2-е изд. - 367 с.

41. Гарабажиу, А.А. Новая конструкция центробежного смесителя для перемешивания сухих сыпучих материалов / А.А. Гарабажиу, Д.В. Клоков // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2018. – Т. 6. - № 4(40). – С. 293-297.

42. Генералов, М. Б. Истечение сыпучих материалов из аппаратов / М. Б. Генералов // Теоретические основы химической технологии. – 1985. - Т.19. - №1. – С. 53-59.

43. Герасименко, Н. Ф. Здоровое питание и его роль в обеспечении качества жизни / Н. Ф. Герасименко, В. М. Позняковский, Н. Г. Челнакова // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2016. – Т. 12. - № 4. – С. 52–57.

44. Гмурман, В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике / В.Е. Гмурман.– М.: Высшая школа, 2000. – 5-е изд. - 400 с.

45. Гордеев, Л. С. Анализ структуры потоков в каскаде аппаратов идеального смешения с дополнительным потоком в каждый аппарат / Л. С. Гордеев // Известия ВУЗов «Химия и химическая технология». – 1981. - Т. 24. – № 4. – С. 503–509.

46. ГОСТ 28808-90 Хлеб из пшеничной муки. Общие технические условия [текст]. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 9 с.
47. ГОСТ Р 55569-2013 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Определение протеиногенных аминокислот методом капиллярного электрофореза [текст]. – М.: Стандартинформ, 2014. – 31 с.
48. Грачев, Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев, Ю.М. Плаксин. – М.: ДеЛиПринт, 2005. – 296 с.
49. Домащенко, Д.А. Типы смесителей для смешивания сухих сыпучих компонентов / Д.А. Домащенко // Сб. исследование по механизации и электрификации сельского хозяйства. – 1968. – С. 199-204.
50. Евсеев, А. В. Новый критерий оценки качества смесей сыпучих материалов / А. В. Евсеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 11–1. – С. 139–147.
51. Жилияков, Е.Г. Основы эконометрического анализа данных: учебное пособие / Е.Г. Жилияков, Ю.М. Перлов, Е.П. Ревтова. - Белгород: Белгород, 2004. - 102 с.
52. Закгейм, А. Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов. Математическое описание процессов: учебное пособие [текст] / А. Ю. Закгейм. - М.: Химия, 1973. – 224 с.
53. Злобин, С.В. Определение мощности, потребляемой виброприводом смесителя / С.В. Злобин, С.Ю. Рокосов // Пищевые продукты и здоровье человека. IV Всероссийская конференция аспирантов и студентов. – Кемерово. - 2012. – С. 317-318.
54. Злобин, С.В. Результаты определения пропускной способности вибрирующих отверстий / С.В. Злобин, О.П. Рынза // Пищевые продукты и здоровье человека. II Всероссийская конференция аспирантов и студентов. – Кемерово. - 2010. - С. 316-317.
55. Зорина, Т.В. Анализ конструкций каскадных вибрационных смесителей / Т.В. Зорина, Е.А. Шушпанников, А.С. Шушпанникова // Пищевые инновации и биотехнологии: материалы V Международной научной конференции. – Кемерово. - 2017. – С. 158-160.

56. Зорина, Т.В. Моделирование процесса последовательного разбавления при смешивании сыпучих материалов / Т.В. Зорина, Е.А. Шушпанников // Пищевые инновации в биотехнологии: сборник тезисов VI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Кемерово. - 2018. – Т.1. – С. 140-142.

57. Иванец, В. Н. Анализ работы смесителей непрерывного действия центробежного типа на основе корреляционного подхода / В. Н. Иванец, Д. М. Бородулин, А. А. Андрияшков // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – № 8. – С. 23-26.

58. Иванец, В. Н. Интенсификация процесса смешивания высокодисперсных материалов направленной организацией потоков: автореф. дисс. ... докт. техн. наук: 05.18.12 / В. Н. Иванец. – Одесса, 1989. – 32 с.

59. Иванец, В. Н. Интенсификация процессов гомогенизации и диспергирования при получении сухих, увлажненных и жидких комбинированных продуктов / В. Н. Иванец, И. А. Бакин, Г. Е. Иванец // Техника и технология пищевых производств. – 2012. – № 3. – С. 34–45.

60. Иванец, В.Н. Анализ работы центробежных смесителей непрерывного действия на основе математических моделей / В.Н. Иванец, И.А. Бакин, Д.М. Бородулин // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2003. - № 5.– С. 75-77.

61. Иванец, В.Н. Методы моделирования процессов смешивания дисперсных материалов при непрерывной и дисперсной загрузке смесительного агрегата / В.Н. Иванец, Б.А. Федосенков // Известия ВУЗов «Пищевая технология». – 1988. - №5. – С. 68-72.

62. Иванец, В.Н. Процессы дозирования сыпучих материалов в смесеприготовительных агрегатах непрерывного действия – обобщенная теория и анализ / В.Н. Иванец, Б.А. Федосенков. – 2002. - 211 с.

63. Иванец, В.Н. Процессы и аппараты химической технологии: учебное пособие для студентов ВУЗов [текст] / В.Н. Иванец, Д.М. Бородулин – Кемерово: КемТИПП, 2006. – 172 с.

64. Иванец, В.Н. Смесители порошкообразных материалов для витаминизации пищевых и кормовых продуктов / В.Н. Иванец // Известия ВУЗов «Пищевая технология». – 1988. - № 1. – С. 89-97.

65. Иванец, Г.Е. Метод моделирования процесса смешения в вибрационных смесителях непрерывного действия на основе корреляционного анализа / Г.Е. Иванец, Ю.А. Коршиков, Ю.И. Макаров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2000. - № 3. - С. 7-11.

66. Иванец, Г.Е. Разработка и исследование вибрационного смесителя для получения комбинированных продуктов питания / Г.Е. Иванец, М.В. Баканов, Ю.А. Матвеев // Продовольственный рынок и проблемы здорового питания: материалы третьей Международной научно-практической конференции. - Орел. - 2000. - С. 352-354.

67. Иванец, Г.Е. Разработка и исследование вибрационного смесителя для порошкообразных материалов / Г.Е. Иванец, Ю.И. Макаров // Научные труды КузПИ. – Кемерово, 1989. - С. 106-111.

68. Иванец, Г.Е. Разработка вибрационных смесителей с прямыми и обратными контурами рециклов смешиваемых потоков сыпучих материалов. автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.18.04. - Кемерово, 1990. – 16 с.

69. Ивлева, И.А. Технология материалов: учебное пособие / И.А. Ивлева, Н.П. Бушуева, О.А. Панова. – Белгород: Белгород, 2014. - 100 с.

70. Инструкция по предупреждению попадания посторонних предметов в продукцию [текст]. - Минхлебпродукт СССР, 1988. – 5 с.

71. Казначеева, Т.В. Виброперемещение муки по винтовому лотку / Т.В. Казначеева // Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения М.Х. Кишиневского. – Воронеж. - 2016. – С. 54-57.

72. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов [текст] / А.Г. Касаткин. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 10-ое изд. – 753 с.

73. Каталог. Смесители для сыпучих и пастообразных материалов. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1985. – С. 42-44.

74. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, С.Ю. Арутюнов. – М.: Наука, 1985. – 359 с.

75. Кафаров, В.В. Кинетика смешения бинарных композиций, содержащих твердую фазу / В.В. Кафаров, А.А. Александровский, И.Н. Дорохов // Теоретические основы химической технологии. – 1976. - Т. 10. – № 1. – С. 149–153.

76. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. – М.: Наука, 1976. – 499 с.

77. Колмаков, Ю. В. Мучные кондитерские изделия повышенной белковости / Ю. В. Колмаков, Л. А. Зелова, И. В. Пахотина // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2015. – Т. 103. - № 4. – С. 45–47.

78. Колмаков, Ю. В. Хлеб из композитных мучных смесей / Ю. В. Колмаков, Л. А. Зелова, И. В. Пахотина // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – Т. 126. - № 4. – С. 133–136.

79. Кононов, Б.А. Классификация и анализ смесителей кормов / Б.А. Кононов, Н.Г. Шпагин // Сборник научных трудов Саратовского института механизации сельского хозяйства. – Саратов. - 1978. – Вып. 123. – С. 26-34.

80. Конструирование и расчет машин химических производств [текст] / Ю.И. Гусев, И.Н. Карасев, Э.Э. Кольман-Иванов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 408 с.

81. Коршиков, Ю.А. Разработка и исследование барабанного смесителя непрерывного действия для переработки пищевых сыпучих материалов : дисс. ... канд. техн. наук : 05.18.04 / Ю.А. Коршиков. – Кемерово, 1996. – 187 с.

82. Куприна, И.К. Экономика и организация производства: методические указания для выполнения курсовой работы / И. К. Куприна. – Кемерово: КемТИПП, 2006. - 23 с.

83. Ловкис, З. В. Здоровье нации в здоровом питании / З.В. Ловкис, Е.П. Франко // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2014. – Т. 24. - № 2. – С. 3–8.
84. Ляшенко, В.С. Обзор и анализ смесителей сыпучих кормов / В.С. Ляшенко // Вестник Омского государственного аграрного университета. - 2015. - №. 2(18). - С. 56-60.
85. Макаров, Ю.И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов [текст] / Ю.И. Макаров. – М.: Машиностроение, 1973. – 215 с.
86. Матвеев, Ю.А. Разработка вибрационного смесительного агрегата с направленной организацией материальных потоков для получения комбинированных продуктов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.18.04 / Ю.А. Матвеев. – КемТИПП: Кемерово, 2001. - 232 с.
87. Метод определения коэффициента неоднородности смеси при взаимодействии разреженных потоков / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, А. Б. Петров [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55. - № 11. – С. 119–121.
88. Методы анализа смесей сыпучих материалов / И.Н. Шубин, Н.С. Потемкин, Т.В. Гурова, В.Ю. Кондратьев // Ученые записки Тамбовского отделения РоСМУ. – 2014. – №2. - С. 283-287.
89. Могильный, М. П. Роль функциональных свойств белков в специальных видах питания / М. П. Могильный // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2009. – Т. 307. - № 1. – С. 51–54.
90. Николаев, В. Н. Анализ вибрационных смесителей сыпучих кормов / В. Н. Николаев, Е.О. Фетисов, Е. В. Зязев // Инновации, технологии, наука: 221 сб. статей международной научно-практической конференции. – Самара. - 2015. - Ч. 1. - С. 100-104.
91. Новый справочник химика и технолога. Общие сведения. Строение вещества. Физические свойства важнейших веществ [текст] / Е.Е. Библик, Л.М. Быкова, В.Г. Вавилов и др. – Санкт-Петербург: НПО «Профессионал», 2006. – 1464 с.

92. О перспективах использования муки из пшеницы при производстве хлебобулочных и мучных кондитерских изделий / И. М. Русина, А. Ф. Макаричев, К. Ю. Чебан [и др.] // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2014. – Т. 24. – № 2. – С. 39–45.

93. Определение ключевых параметров работы вибрационного смесителя при получении мучных хлебопекарных смесей / Д.М. Бородулин, Т.В. Зорина, В.Н. Иванец [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – № 1 (49). – С. 77-84.

94. Определение рациональных параметров работы барабанного смесителя на основе регрессионного анализа при получении сухой йогуртной основы / Д.М. Бородулин, В.Г. Будрик, М.Т. Шульбаева, А.В. Шафрай // Техника и технология пищевых производств. – 2016. – Т. 41. – № 2. – С. 84-90.

95. Определение рациональных параметров работы вибрационного смесителя при получении сухих комбинированных продуктов / Д. М. Бородулин, Т.В. Зорина, С.С. Комаров, Г.Ф. Сахабутдинова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2019. – № 2. – С. 119-129.

96. Определение сглаживающей способности вибрационного смесителя на основе корреляционного анализа / Д.М. Бородулин, А.Б. Шушпанников, Т.В. Зорина [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2018. – Т. 80. – № 4. – С. 30-34.

97. Орехова, Т. Н. Современные технические средства, применяемые для смешения сухих многокомпонентных смесей / Т. Н. Орехова, В. А. Уваров, В. В. Краснов // Научный альманах. – 2016. – Т. 24. – № 10–3. – С. 232–235.

98. Особенности конструкций подъемных винтовых вибрационных смесителей непрерывного действия / А.Б. Шушпанников, Д.М. Бородулин, С.В. Злобин, С.Ю. Рокосов // Техника и технология пищевых производств. – 2013. – № 2(29). – С. 102-106.

99. Оценка инерционных свойств вертикально-вибрационных смесителей / А.Б. Шушпанников, А.Г. Золин, О.П. Рынза, С.В. Злобин // Техника и технология пищевых производств. – 2010. – №1. – С. 18-19.

100. Пат. 2181664 Российская Федерация, МПК⁷ В 28 С 5/04. Вибрационный смеситель [текст] / Шушпанников А.Б., Иванец В.Н., Иванец Г.Е. Баканов М.В., Матвеев Ю.А.; заявитель и патентообладатель КемТИПП. - № 2000104249/03; заявл. 21.02.2000; опубл. 27.04.2002, Бюл. 12.

101. Пат. 2193916 Российская Федерация, МПК⁷ В 01 F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Иванец В.Н., Иванец Г.Е., Баканов М.В., Матвеев Ю.А., Шушпанников А.Б.; заявитель и патентообладатель КемТИПП. - №2000105744/12; заявл. 07.03.2000; опубл. 10.12.2002, Бюл. 34.

102. Пат. 2209109 Российская Федерация, МПК⁷ В 01 F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Иванец В.Н., Баканов М.В., Матвеев Ю.А., Шушпанников А.Б., Иванец Г.Е.; заявитель и патентообладатель КемТИПП. - № 2000105932/12, заявл. 10.03.2000; опубл. 27.07.2003, Бюл. 21.

103. Пат. 2286203 Российская Федерация, МПК⁷ и В01F 11/00, В01F 3/18 / Вибрационный смеситель / Шушпанников А.Б., Иванец Г.Е., Золин А.Г., Чистюхин В.Н., Капранков Е.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КемТИПП. - №2005114076/15; заявл. 11.05.2005; опубл. 27.10.2006, Бюл. 30.

104. Пат. 2488435 Российская Федерация, МПК⁷ В01F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / А.Б. Шушпанников, А.Н. Потапов, С.В. Злобин, О.П. Рынза; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО КемТИПП (Ru). - № 2012105486/05; заявл. 16.02.2012; опубл. 27.07.2013, Бюл. 21.

105. Пат. 2547486 Российская Федерация, МПК⁷ В01F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Шушпанников А.Б., Шушпанников Е.А., Крохалёв А.А., Федосенков Б.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КемТИПП. - №2014102385/05; заявл. 24.01.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. 10.

106. Пат. 2613045 Российская Федерация, МПК⁷ В01F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Шушпанников А.Б., Бородулин Д.М., Ратников С.А., Шушпанников Е.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КемТИПП. - № 2015117133; заявл. 05.05.2015; опубл. 15.03.2017, Бюл. 8.

107. Пат. 2626415 Российская Федерация, МПК⁷ В01F 11/00. Вибрационный смеситель [текст] / Шушпанников А.Б., Зорина Т.В., Шушпанников Е.А.,

Шушпанникова А.С.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КемТИПП. - №2016149970; заявл.19.12.2016; опубл. 27.07.2017, Бюл. 21.

108. Пустовалов, Г.Е. Погрешности измерений: методическая разработка по общему физическому практикуму / Г.Е. Пустовалов. - М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2001. - 17 с.

109. Пушко, В.А. Перспективы применения смесительного оборудования вибрационного типа в условиях инновационного комбикормового производства / В.А. Пушко, И.Г. Бойко // Вестник ВНИИМЖ. - 2017. - № 1(25). - С. 78-82.

110. Разработка смесительного агрегата для получения мучных хлебопекарных смесей с повышенным содержанием белка / Д.М. Бородулин, Т.В. Зорина, Е.В. Невская [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2019. - № 4 (49). – С. 579-586.

111. Разработка смесительного агрегата непрерывного действия и математическое моделирование процесса / А.Б. Шушпанников, В.Н. Чистюхин, А.Г. Золин, А.С. Назимов. – Кемерово: КемТИПП, 2004. – 37 с.

112. Ратников, С.А. Интенсификация смесеприготовительных процессов производства дисперсных комбинированных продуктов / С.А. Ратников. – Кемерово: КемТИПП, 2003. – 50 с.

113. Ратников, С.А. Разработка и исследование непрерывно-действующего смесительного агрегата центробежного типа для получения сухих и увлажненных комбинированных продуктов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.18.04. – КемТИПП: Кемерово, 2001. - 204 с.

114. Рокосов, С.Ю. Исследование влияния некоторых факторов на скорость перемещения муки по лотку винтового вибрационного смесителя / С.Ю. Рокосов, С.В. Злобин // Пищевые продукты и здоровье человека. IV Всероссийская конференция аспирантов и студентов. – Кемерово. - 2012. – С. 345-346.

115. Рокосов, С.Ю. Определение скорости перемещения муки по лотку винтового вибрационного конвейера / С.Ю. Рокосов, С.В. Злобин, О.П. Рынза // Инновационный конвент «Кузбасс: Образование, наука, инновации». – Кемерово. - 2011. – С. 46-47.

116. Роль основных минеральных веществ в питании детей / Л. М. Панасенко, Т. В. Карцева, Ж. В. Нефедова [и др.] // Российский вестник перинатологии и педиатрии. – 2018. – Т. 63. - № 1. – С. 122–127.

117. Савкевич, Д.В. Классификация смесителей для твердых сыпучих порошкообразных материалов / Д.В. Савкевич // Химическая промышленность. – 1953. - №10. – с. 33-34.

118. СанПиН 2.3.2.1078-01 Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. - М.: Стандартинформ, 2002. - 180 с.

119. Совершенствование оборудования для приготовления сыпучих смесей / В.В. Матюшев, И.А. Чаплыгина, А.В. Семенов [и др.] // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: материалы международной научно-практической конференции 23-27 апреля 2020 г. – Красноярск. - 2020. – С. 175-178.

120. Современное смесительное оборудование для приготовления многокомпонентных энергонасыщенных композиций / М.В. Коробчук, А.Н. Веригин, В.Г. Джангирян [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. - 2013. - Т. 16. - № 4. - С. 240-243.

121. Современные конструкции и основы расчета смесительных аппаратов с тонкослойным движением сыпучих материалов / А.И. Зайцев, Д.О. Бытев, В.А. Северцев [и др.] // Обзорная информация. Серия: Хим-фарм. пром. – М.: ЦБНТИ Мед. Пром., 1984. – 23 с.

122. СП 2.3.4.3258-15 Санитарно-эпидемиологические требования к организациям по производству хлеба, хлебобулочных и кондитерских изделий. - М.: Стандартинформ, 2015. – 24 с.

123. Сулеин, Г.С. Разработка и исследование смесительного агрегата с внутренним рециклом для сыпучих материалов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. - М.: МИХМ, 1987. – 16 с.

124. ТР ТС 022/2011 Пищевая продукция в части ее маркировки. - М.: Стандартинформ, 2002. – 2011. – 29 с.

125. Уваров, В. А. Анализ оборудования непрерывного действия для смешивания сухих многокомпонентных смесей / В. А. Уваров, Т. Н. Орехова, В. В. Краснов // Научный альманах. – 2016. – Т. 24. - № 10-3. – С. 313–315.

126. Устройство для анализа проб при определении концентрации ключевого компонента в сыпучей смеси / А.Б. Шушпанников, А.А. Крохалев, Е.А. Шушпанников, Т.В. Казначеева // Пищевые инновации и биотехнологии: материалы Международной научной конференции. – Кемерово. - 2014. – Т.1. – С. 331-332.

127. Хатко, З. Н. Хлебопекарные дрожжи: характеристика и способы их активации / З. Н. Хатко, А. А. Стойкина // Новые технологии. – 2016. – № 2. – С. 39–44.

128. Членов, В.А. Виброкипящий слой / В.А. Членов, Н.В. Михайлов. – М.: Наука. 1972. – 340 с.

129. Шилов, А.В. Выбор рациональных параметров процесса приготовления мучных композитных смесей / А.В. Шилов, Д.В. Сухоруков, И.А. Бакин // Техника и технология пищевых производств. - 2010. - № 4(19). - С. 72-76.

130. Шубин, И.Н. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства: учебное пособие / И.Н. Шубин, М.М. Свиридов, В.П. Таров. – ТГТУ: Тамбов, 2005. - 76 с.

131. Шупов, Л.П. Математические модели усреднения / Л.П. Шупов. – М.: Недра, 1978. – 225с.

132. Шушпанников, А.Б. Взаимосвязь инерционных свойств вертикального винтового вибрационного смесителя и его геометрических характеристик / А.Б. Шушпанников, М.В. Баканов // Техника и технология пищевых производств. – 2011. – № 1 (20). – С. 100-105.

133. Шушпанников, А.Б. Исследование дозатора дискретно-циклического действия / А.Б. Шушпанников, Е.А. Шушпанников, Т.В. Казначеева // Пищевые инновации и биотехнологии: материалы Международной научной конференции. – Кемерово. - 2014. – Т.1. – С. 333-334.

134. Шушпанников, А.Б. Методология построения смесеприготовительных агрегатов вибрационного типа для сыпучих композиций : дисс. ... д-ра техн. наук: 05.18.12 /А.Б. Шушпанников. – КемТИПП: Кемерово, 2016. – 193 с.

135. Шушпанников, А.Б. Обоснование выбора вибропривода для винтовых смесителей / Шушпанников А.Б. // Техника и технология пищевых производств. – 2011. – №1. - С. 94-100.

136. Шушпанников, А.Б. Смесительные агрегаты вибрационного типа для дисперсных материалов / Шушпанников А.Б., Иванец Г.Е. – Кемерово: КемТИПП, 2008. – 94 с.

137. Шушпанников, Е.А. Анализ конструкций прямоточных винтовых вибрационных смесителей / Е.А. Шушпанников, Т.В. Зорина, А.С. Шушпанникова // Пищевые инновации и биотехнологии: материалы V Международной научной конференции. – Кемерово. - 2017. – С. 207-209.

138. Шушпанникова, А.С. Разработка вибрационного смесителя / А.С. Шушпанникова, Е.А. Шушпанников, Т.В. Зорина // Пищевые инновации и биотехнологии: материалы V Международной научной конференции. – Кемерово. - 2017. – С. 210-211.

139. A systematic study of the residence time of flour in a vibrating apparatus used for thermal processing / S. Keppler, S. Bakalis, C.E. Leadley, P.J. Fryer // Innovative food science and emerging technologies. – 2016. – Vol. 33. – P. 462-471.

140. Akiyama, T. Compressible Gas Model of Vibrated Particulate Beds / T. Akiyama, H. Kurimoto // Chem. Eng. Scien. – 1988. – Vol. 43. – P. 2645–2653.

141. Aubin, J. Current methods for characterising mixing and flow in microchannels / J. Aubin, M. Ferrando, V. Jiricny // Chemical engineering science. – 2010. – Vol. 65. - № 6. – P. 2065-2093.

142. Bauman, I. Mixing of solids in different mixing devices / I. Bauman, D. Curic, M. Boban // Sadhana. – 2008. – Vol. 33. - № 6. – P. 721-731.

143. Berruti, F. Measuring and Modeling Residence Time Distribution of Low Density Solid in a Fluidized Bed Reator of Sand Particles / F. Berruti, A.G. Liden, D.S. Scott // Chem. Eng. Scien. – 1988. – Vol. 43. – P. 739–748.

144. Borodulin, D.M. Comparing efficiency of two centrifugal mixers producing dry combined mixtures / D.M. Borodulin, D.V. Sukhorukov // Science, Technology and Higher Education, Materials of the III international research and practice conference. – 2013. - P. 146-150.

145. Borshchev, V.Ya. Current status and development of production technologies of multicomponent mixtures of bulk materials in large volumes / V.Ya. Borshchev, T.A. Sukhorukova // Advanced materials and technologies. – 2018. - № 1. – P. 69-77.

146. Brazhnik, Yu.V. Influence of design and technological parameters of a high-speed paddle mixer on the quality of dry building mixes / Yu.V. Brazhnik, N.P. Nesmeyanov, A.A. Brazhnik // Innovations and technologies in construction. – Institute of Physics Publishing: Belgorod, 2020. - Vol. 945. – 5 p.

147. Brone, D. Quantitative characterization of mixing of dry powders in V-blenders / D. Brone, A. Alexander, F. Muzzio // AIChE. – 1998. – № 44 (2). – P. 271–278.

148. Complex modeling of technological processes in pneumatic mixers for production of dry construction mixtures / T.N. Orekhova, O.A. Nosov, V.S. Prokopenko, A.E. Kachaev // International conference on mechanical engineering, automation and control systems 2017 - simulation and automation of production engineering. - Institute of physics publishing: Tomsk, 2017. – 6 p.

149. Design of drum type apparatus for processing of bulk materials / V.N. Ivanec, D.M. Borodulin, D.V. Sukhorukov [and etc] // Procedia chemistry. – 2014. – Vol. 10. – P. 391-399.

150. Determination of technological parameters for the production of enriched flour mixtures in a drum mixer / I.Yu. Reznichenko, D.M. Borodulin, A. M. Chistyakov [and etc] // International scientific and practical conference: biotechnology in the agro-industrial complex and sustainable environmental management. - IOP publishing ltd: Veliky Novgorod, 2020. – 4 p.

151. Emeljanova, I. The universality of mixers gravity-forced action / I. Emeljanova, A. Anishchenko, V. Yanchenko // Pridneprovskiy scientific bulletin. – 2016. - Vol. 12. – P. 1060-1066.

152. Evseev, A.V. Automatic mixers for the synthesis of functional mixtures with desired properties from small batches / A.V. Evseev // Journal of physics: conference series. - EDP Sciences: Omsk, 2019. – 5 p.

153. Experimental studies of energy characteristics of mixer with deformable camera / S.Y. Lozovaya, N.M. Lozovoy, L.V. Ryadinskaya [and etc] // International conference complex equipment of quality control laboratories. - EDP sciences: Saint-Petersburg, 2018. – 5 p.

154. Factors of increasing the performance of the bulk material mixer of the gravity type / A. Kapranova, I. Verloka, D. Bahaeva, M. Tarshis // Lecture notes in civil engineering. – Vol. 70. – P. 337-347.

155. Functional model of barrel mixer of bulk solids / V.P. Teryushkov, A.V. Chupshev, V.V. Konovalov, Yu.V. Rodionov // Journal of physics: conference series. - Institute of physics publishing: Tambov, 2020. – 8 p.

156. Functional model of energy consumption for mixing with a vertical paddle mixer / A.V. Chupshev, V.P. Teryushkov, V. Konovalov [and etc] // 12th international scientific conference on agricultural machinery industry. - EDP Sciences: Rostov-on-Don, 2019. – 5 p.

157. Functional model of rotary drum mixer of bulk materials / V.P. Teryushkov, A.V. Chupshev, V.V. Konovalov, Yu.V. Rodionov // Materials of the international scientific and practical conference: prospects for the development of agrarian sciences. – CSAA: Cheboksary, 2019. – P. 108-110.

158. Harwood, C. The Performance of Continuous mixers for dry powders / C. Harwood, K. Walanski, E. Luebcke // Powder Technology. – 1975. – № 11. – P. 289–296.

159. Intensification of bulk material mixing in new designs of drum, vibratory and centrifugal mixers / V.N. Ivanets, D.M. Borodulin, A.B. Shushpannikov, D.V. Sukhorukov // Foods and Raw Materials. – 2015. – Vol. 3. - № 1. – P. 62–69.

160. Ivanec, V.N. Development of mathematical models of centrifugal mixing units of new design for the production of dry combined food products / V.N. Ivanec, D.M. Borodulin // Foods and raw materials. – 2013. - Vol. 1. – № 1. – P. 54-65.

161. Ivanets, V.N. New designs of mixers for multicomponent compositions / V.N. Ivanets // Chemical and petroleum engineering. – 1992. - № 1. – P. 20-22.

162. Kaitukov, B.A. Selection of mixers for preparation of quality building mixtures / B.A. Kaitukov, M.A. Stepanov // Lecture notes in mechanical engineering. – 2019. – P. 2295-2301.

163. Kendall, M. The Advanced Theory of Statistics Inference and Relationship / M. Kendall, A. Stuart. - London: edition 4Rev Ed, 1979. - 758 p.

164. Kuakpetoon, D. Dry mixing of wheat flours: effect of particle properties and blending ratio / D. Kuakpetoon, R.A. Flores, G.A. Milliken // LWT- Food science and technology. – 2001. - Vol. 34. - № 3. – P. 183-193.

165. Miller, R.E. Correlation and regression / R.E. Miller // Chem. Eng. – 1985. – Vol. 92. – № 20. – P. 71-75.

166. Mizonov, V. Mixing of segregating particulate solid: from mathematical modeling to mixers design / V. Mizonov, H. Berthiaux // 8th international conference for conveying and handling of particulate solids. - Tel Aviv. – 2015. – № 8. - P.

167. Modeling the horizontal movement of bulk material in the system «conveyor - rotary mixer» / V. Zasel'skiy, S. Shved, M. Shepelenko, N. Suslo // International conference on sustainable futures: environmental, technological, social and economic matters. - EDP sciences: Kryvyi Rih, 2020. – 5 p.

168. Nevskaya, E. V. Development of integrated technology and assortment of long-life rye-wheat bakery products / E.V. Nevskaya, D.M. Borodulin, V.L. Potekha // Foods and Raw Materials. – 2018. – Vol. 6. - № 1. – P. 99–109.

169. Quality assessment of high mixing equipment based on rotary vane spiral mixer / N.P. Nesmeyanov, P.S. Gorshkov, Y.V. Brazhnik, M.N. Khal'fin // Middle east journal of scientific research. – 2013. - Vol. 18. - № 10. – P. 1463-1472.

170. Simulation of mixing process in drum mixer with different topology of material flows / D.M. Borodulin, I.A. Bakin, D.V. Sukhorukov, S.A. Ratnikov // Advances in engineering research. - Atlantis press: Tyumen, 2018. – P. 685-689.

171. The definition of basic parameters of the set of small-sized equipment for preparation of dry mortar for various applications / I. Emelyanova, V. Blazhko, S. Dansheva, N. Shyshko // 12th international scientific conference on agricultural machinery industry. - EDP sciences: Rostov-on-Don, 2019. – 6 p.

172. The rotating layer mechanics of polydisperse particles in the continuous action pneumatic mixers / T.N. Orekhova, V.S. Prokopenko, V.V. Okushko, A.E. Kachaev // The international scientific conference «construction and architecture: theory and practice for the innovation development». - IOP publishing ltd: Kislovodsk, 2019. – 5 p.

173. Theoretical basis for the calculation of energy parameters of a paddle mixer with high-speed operation / Y.V. Brazhnik, N.P. Nesmeyanov, S.Y. Lozovaya, A.A. Brazhnik // IOP conference series: materials science and engineering. - EDP Sciences: Novosibirsk, 2019. – 8 p.

174. Tupolskikh, T. Simulation of the process of movement of bulk material in a vibrating conveyor-mixer / T. Tupolskikh, N. Gucheva, O. Kirishiev // International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment. – EDP Sciences: Sevastopol, 2018. – 4 p.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 626 415** (13) **C1**



(51) МПК
B01F 3/18 (2006.01)
B01F 11/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 06.08.2020)
Пошлина: учтена за 5 год с 20.12.2020 по 19.12.2021

(21)(22) Заявка: **2016149970, 19.12.2016**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
19.12.2016

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **19.12.2016**

(45) Опубликовано: **27.07.2017** Бюл. № 21

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2547486 C1, 10.04.2015. RU 2286203 C1, 27.10.2006. RU 2181664 C2, 27.04.2002. GB 1094600 A, 13.12.1967. US 3735963 A1, 29.05.1973.**

Адрес для переписки:

**650056, г. Кемерово, б-р Строителей, 47,
ауд. 1213, КемТИПП, патентовед Сырцева
А.П.**

(72) Автор(ы):

**Шушпанников Андрей Борисович (RU),
Зорина Татьяна Владимировна (RU),
Шушпанников Евгений Андреевич (RU),
Шушпанникова Анастасия Сергеевна
(RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Кемеровский
технологический институт пищевой
промышленности (университет)" (RU)**

(54) ВИБРАЦИОННЫЙ СМЕСИТЕЛЬ

(57) Реферат:

Изобретение относится к аппаратам непрерывного действия для смешения сыпучих материалов. Вибрационный смеситель содержит вертикальный цилиндрический загрузочный бункер с установленными в его верхней части патрубками ввода сыпучих ингредиентов, а на дне - винтовым лотком, наклоненным в сторону движения материала, сквозное отверстие в стенке бункера для выхода материала на нижний виток закрепленного на его внешней поверхности винтового перфорированного лотка, имеющего противоположный наклон, последний вверху заканчивается выгрузочным патрубком, а снизу под ним, с примыканием к нижней его кромке, горизонтально расположен сплошной кольцевой лоток, в стенке бункера дополнительно выполнены отверстия, через которые отдельные патрубки ввода подают ингредиенты сразу на внешний винтовой лоток,

расширяющийся в этих местах пропорционально количеству поступающего материала. Техническим результатом является расширение диапазона соотношений смешиваемых ингредиентов. 2 ил.

Изобретение относится к аппаратам непрерывного действия для смешения сыпучих материалов.

Известен вибрационный смеситель [1], состоящий из вертикального цилиндрического загрузочного бункера с верхним и нижним отверстиями в стенке, между которыми на его внешней поверхности с подъемом в сторону движения сыпучего материала закреплен основной спиральный желоб (винтовой лоток) с перфорированными витками, кроме нижнего. На конце желоба (лотка) у верхнего отверстия установлены выгрузочный патрубок и подвижная заслонка (делитель потока). На дне загрузочного бункера, расположенного на уровне нижнего отверстия, соосно с ним, установлена вставка по форме тела вращения, на которой закреплена дополнительная спиральная лопасть с наклоном в сторону движения материала. Независимо от количества ее витков, нижний виток сплошной, остальные - перфорированные.

К недостатку смесителя следует отнести наличие снизу у перфорированного внешнего винтового лотка сплошного витка, который является днищем этой части рабочего органа. На нем образуется более плотный слой сыпучего материала по сравнению с перфорированными, что снижает качество смеси и повышает энергопотребление.

Наиболее близким по сути является вибрационный смеситель [2], содержащий вертикальный цилиндрический загрузочный бункер, на внешней поверхности которого зафиксирован с подъемом в сторону движения сыпучего материала перфорированный многовитковый винтовой лоток, заканчивающийся вверху выгрузочным патрубком, а снизу - сплошным горизонтальным кольцевым лотком. В стенке бункера над концами винтового лотка выполнены два сквозных отверстия. У верхнего, предназначенного для возврата части готовой композиции, установлен делитель потока, а у нижнего, на дне загрузочного бункера, размещен с противоположным наклоном внешнему другой винтовой лоток, который осуществляет предварительное смешивание ингредиентов.

Известно, что получение качественных смесей усложняется с ростом соотношений ингредиентов. Поэтому для облегчения задачи ингредиенты с наименьшим расходом, например, предварительно смешивают между собой, а затем этот полуфабрикат с оставшимся компонентом. Можно также последовательно смешивать ингредиенты, начиная с «малого». Существуют и другие варианты. В случае бинарных композиций - «малый» (М) сначала смешивают с частью «большого» (Б), а затем со всей оставшейся. Или в «малый» частями добавляют «большой», т.е. реализуют метод «последовательного разбавления». Этого невозможно добиться в вибрационном смесителе, выбранного в качестве прототипа.

Техническим результатом является расширение диапазона соотношений смешиваемых ингредиентов. Это достигается за счет применения в предлагаемом техническом решении метода «последовательного разбавления» путем установки в загрузочном бункере патрубков, по которым ингредиенты или их части подаются через дополнительные окна, выполненные в стенке бункера, на витки «внешнего» рабочего органа.

На фиг. 1 показан общий вид смесителя; на фиг. 2 - его упрощенная аксонометрическая проекция.

Вибрационный смеситель содержит вертикальный цилиндрический загрузочный бункер 1 с установленными в его верхней части патрубками ввода сыпучих ингредиентов 2, 3 и 4, а на дне 5 - винтовым лотком 6, наклоненным в сторону движения материала. Сквозное отверстие 7 в стенке бункера предназначено для выхода материала на нижний виток закрепленного на его внешней поверхности винтового перфорированного лотка 8, имеющего противоположный наклон. Вверху он заканчивается выгрузочным патрубком 9, а снизу под ним, с примыканием к нижней его кромке, горизонтально расположен сплошной кольцевой лоток 10. В стенке бункера дополнительно выполнены отверстия,

через которые патрубки ввода 3 и 4 подают отдельные ингредиенты сразу на внешний винтовой лоток, расширяющийся в этих местах пропорционально количеству поступающего материала.

С целью упрощения понимания рассмотрим работу устройства, в котором реализован принцип «последовательного разбавления» в три этапа, на примере получения бинарной композиции. В целом, решение о количестве разбавлений принимают проектировщики исходя из свойств компонентов, их числа, соотношений и требований к качеству готового продукта.

Ингредиент с малым M расходом и часть «большого» $B1$ подают в загрузочный бункер 1 через патрубок 2 на винтовой лоток 6. Здесь они смешиваются под воздействием винтовых колебаний, создаваемых виброприводом, движутся под уклон и через сквозное отверстие 7 в стенке бункера поступают на «внешний» винтовой перфорированный лоток 8. Перфорация предназначена для просеивания частиц с верхних витков на нижние, а также для поступления воздуха под слой, что способствует их более легкому перераспределению в нем. Поскольку угол подъема колебаний больше угла подъема винтовой линии лотка 8, они, помимо смешивающего эффекта, заставляют сыпучий материал подниматься по нему вверх. Вторую долю «большого» ингредиента $B2$ подают через патрубок 3 на лоток 8, который в этом месте расширяется пропорционально количеству поступающего материала. Это также относится и месту вывода оставшейся доли $B3$ через патрубок 4. Если ширину лотка не увеличивать, то это ведет к росту высоты слоя. В свою очередь, это уменьшит скорость транспортирования сыпучего материала и интенсивность его виброкипения вследствие повышения демпфирования слоев силовых импульсов.

Готовый продукт выводится из аппарата через патрубок 9, а сплошной кольцевой лоток 10 играет роль дна перфорированного лотка 8. Последний является основным рабочим органом вибрационного смесителя.

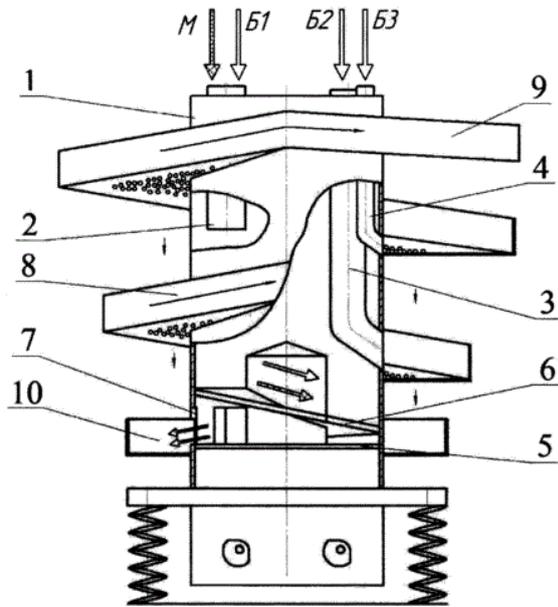
Литература

1. Пат. 2286203 Российская Федерация, МПК⁷ и В01F 11/00, В01F 3/18 / Вибрационный смеситель / Шушпанников А.Б., Иванец Г.Е., Золин А.Г., Чистюхин В.Н., Капранков Е.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КемТИПП. - №2005114076/15; заявл. 11.05.2005; опубл. 27.10.2006, бюл. №30.

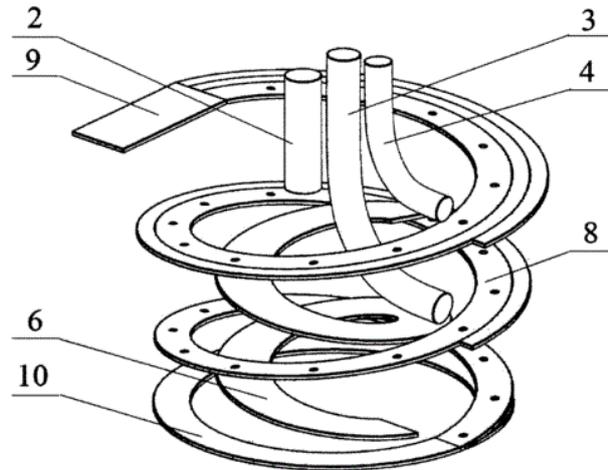
2. Пат. 2547486 Российская Федерация, МПК⁷ и В01F 11/00 / Вибрационный смеситель / Шушпанников А.Б., Шушпанников Е.А., Крохалёв А.А., Федосенков Б.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КемТИПП. - №2014102385/05; заявл. 24.01.2014; опубл. 10.04.2015, бюл. №10.

Формула изобретения

Вибрационный смеситель, содержащий вертикальный цилиндрический загрузочный бункер с установленными в его верхней части патрубками ввода сыпучих ингредиентов, а на дне - винтовым лотком, наклоненным в сторону движения материала, сквозное отверстие в стенке бункера для выхода материала на нижний виток закрепленного на его внешней поверхности винтового перфорированного лотка, имеющего противоположный наклон, последний вверху заканчивается выгрузочным патрубком, а снизу под ним, с примыканием к нижней его кромке, горизонтально расположен сплошной кольцевой лоток, отличающийся тем, что в стенке бункера дополнительно выполнены отверстия, через которые отдельные патрубки ввода подают ингредиенты сразу на внешний винтовой лоток, расширяющийся в этих местах пропорционально количеству поступающего материала.



Фиг.1 – Общий вид смесителя



Фиг.2 – Упрощенная аксонометрическая проекция смесителя

ИЗВЕЩЕНИЯ

РС4А Государственная регистрация перехода исключительного права без заключения договора
(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
"Кемеровский государственный университет" (RU)**

Правопреемник:

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
"Кемеровский государственный университет" (RU)**

Лицо(а), исключительное право которого(ых) переходит без заключения договора:

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
"Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)" (RU)**

Дата и номер государственной регистрации перехода исключительного права: **05.04.2019 РП0009127**

Адрес для переписки:

650000, г. Кемерово, ул. Красная, 6, КемГУ

Дата внесения записи в Государственный реестр: **05.04.2019**

Дата публикации и номер бюллетеня: **05.04.2019 Бюл. №10**

Приложение Б

Таблица Б.1 – Экспериментальные данные зависимости скорости вибротранспортирования v от угла β и частоты колебаний f (смесь №1, $l_{cp}=2,36$ м, $A=4,5$ мм, ВКС=20 мм, без перфорации)

Угол колебаний $\beta, ^\circ$	Частота колебаний $f, \text{Гц}$	Время перемещения частицы-индикатора $t_{л}, \text{с}$	Скорость вибротранспортирования $v, \text{м/с}$	Среднее значение скорости вибротранспортирования $v_{cp}, \text{м/с}$
1	2	3	4	5
30	16,6	32,3	0,073	0,072
		32,8	0,072	
		35,8	0,066	
		30,3	0,078	
		33,2	0,071	
30	20,8	27,1	0,087	0,090
		25,1	0,094	
		26,2	0,090	
		26,5	0,089	
		25,7	0,092	
30	25,0	19,2	0,123	0,123
		18,6	0,127	
		19,0	0,124	
		20,0	0,118	
30	29,2	19,2	0,123	0,125
		19,7	0,120	
		18,6	0,127	
		18,4	0,128	
		18,9	0,125	
30	33,3	18,6	0,127	0,127
		19,3	0,122	
		18,9	0,125	
		18,0	0,131	
		18,3	0,129	
45	16,6	34,2	0,069	0,066
		33,2	0,071	
		35,8	0,066	
		38,7	0,061	
		38,1	0,062	
45	20,8	31,5	0,075	0,076
		31,1	0,076	
		29,9	0,079	
		30,6	0,077	

1	2	3	4	5
45	25,0	21,1	0,112	0,112
		21,7	0,109	
		20,5	0,115	
		22,1	0,107	
		20,9	0,113	
45	29,2	18,3	0,129	0,135
		17,0	0,139	
		17,5	0,135	
		17,6	0,134	
		17,2	0,137	
45	33,3	15,0	0,157	0,162
		14,4	0,164	
		14,8	0,160	
		14,3	0,165	
		14,6	0,162	
60	16,6	57,6	0,041	0,041
		62,1	0,038	
		51,3	0,046	
		59,0	0,040	
		56,2	0,042	
60	20,8	63,8	0,037	0,040
		60,5	0,039	
		59,0	0,040	
		54,9	0,043	
		56,2	0,042	
60	25,0	37,5	0,063	0,068
		35,2	0,067	
		36,9	0,064	
		34,7	0,068	
		32,3	0,073	
60	29,2	27,8	0,085	0,085
		28,1	0,084	
		27,1	0,087	
		28,8	0,082	
		27,4	0,086	
60	33,3	18,6	0,127	0,127
		19,0	0,124	
		18,9	0,125	
		18,0	0,131	
		18,2	0,130	

Таблица Б.2 – Экспериментальные данные зависимости скорости вибротранспортирования v от амплитуды A и частоты колебаний f (смесь №1, $l_{cp}=2,36$ м, $\beta=45^\circ$, ВКС=20 мм, без перфорации)

Амплитуда колебаний A , мм	Частота колебаний f , Гц	Время перемещения частицы-индикатора t_d , с	Скорость вибротранспортирования v , м/с	Среднее значение скорости вибротранспортирования v_{cp} , м/с
1	2	3	4	5
2,5	16,6	78,7	0,030	0,027
		90,8	0,026	
		102,6	0,023	
		87,4	0,027	
		81,4	0,029	
2,5	20,8	78,7	0,030	0,032
		67,4	0,035	
		63,8	0,037	
		81,4	0,029	
		76,1	0,031	
2,5	25,0	52,4	0,045	0,047
		48,2	0,049	
		45,4	0,052	
		57,6	0,041	
		51,3	0,046	
2,5	29,2	40,0	0,059	0,063
		38,7	0,061	
		35,2	0,067	
		36,3	0,065	
		37,5	0,063	
2,5	33,3	24,3	0,097	0,094
		25,7	0,092	
		24,8	0,095	
		25,9	0,091	
		25,1	0,094	
3,5	16,6	36,9	0,064	0,066
		34,2	0,069	
		35,2	0,067	
		36,3	0,065	
		37,5	0,063	
3,5	20,8	34,2	0,069	0,074
		31,5	0,075	
		30,6	0,077	
		32,3	0,073	
		30,3	0,078	

1	2	3	4	5
3,5	25,0	23,1	0,102	0,099
		24,3	0,097	
		24,6	0,096	
		23,8	0,099	
		22,9	0,103	
3,5	29,2	19,3	0,122	0,120
		20,3	0,116	
		19,7	0,120	
		18,9	0,125	
		19,8	0,119	
3,5	33,3	18,3	0,129	0,131
		17,7	0,133	
		17,4	0,136	
		18,4	0,128	
		18,2	0,130	
4,5	16,6	36,3	0,065	0,066
		33,7	0,070	
		37,5	0,063	
		36,3	0,065	
		35,8	0,066	
4,5	20,8	32,8	0,072	0,076
		31,5	0,075	
		28,8	0,082	
		32,3	0,073	
		31,1	0,076	
4,5	25,0	20,9	0,113	0,112
		21,9	0,108	
		20,3	0,116	
		20,9	0,113	
		21,7	0,109	
4,5	29,2	17,5	0,135	0,131
		18,2	0,130	
		18,3	0,129	
		18,0	0,131	
		17,9	0,132	
4,5	33,3	14,8	0,160	0,162
		14,3	0,165	
		14,8	0,159	
		14,7	0,161	
		14,2	0,166	

Таблица Б.3 – Экспериментальные данные зависимости скорости вибротранспортирования v от высоты ВКС и частоты колебаний f (смесь №1, $l_{cp}=2,36$ м, $\beta=45^\circ$, $A=4,5$ мм, без перфорации)

Высота ВКС, мм	Частота колебаний f , Гц	Время перемещения частицы-индикатора t_d , с	Скорость вибротранспортирования v , м/с	Среднее значение скорости вибротранспортирования v_{cp} , м/с
1	2	3	4	5
20	16,6	73,8	0,032	0,027
		98,3	0,024	
		87,4	0,027	
		87,4	0,027	
		102,6	0,023	
20	20,8	76,1	0,031	0,032
		62,1	0,038	
		81,4	0,029	
		78,7	0,030	
		73,8	0,032	
20	25,0	51,3	0,046	0,047
		48,2	0,049	
		48,2	0,049	
		49,2	0,048	
		56,2	0,042	
20	29,2	40,7	0,058	0,063
		37,5	0,063	
		36,3	0,065	
		39,3	0,060	
		35,2	0,067	
20	33,3	24,3	0,097	0,094
		24,8	0,095	
		25,7	0,092	
		27,1	0,087	
		23,8	0,099	
30	16,6	98,3	0,024	0,022
		98,3	0,024	
		124,2	0,019	
		107,3	0,022	
		112,4	0,021	
30	20,8	81,4	0,029	0,029
		84,3	0,028	
		76,1	0,031	
		87,4	0,027	
		81,4	0,029	

1	2	3	4	5
30	25,0	90,8	0,026	0,030
		71,5	0,033	
		78,7	0,030	
		81,4	0,029	
		69,4	0,034	
30	29,2	84,3	0,028	0,033
		65,6	0,036	
		71,5	0,033	
		78,7	0,030	
		65,6	0,036	
30	33,3	63,8	0,037	0,041
		54,9	0,043	
		52,4	0,045	
		62,1	0,038	
		57,6	0,041	
40	16,6	147,5	0,016	0,018
		157,3	0,015	
		118,0	0,020	
		112,4	0,021	
		131,1	0,018	
40	20,8	94,4	0,025	0,023
		90,8	0,026	
		98,3	0,024	
		124,2	0,019	
		107,3	0,022	
40	25,0	131,1	0,018	0,021
		138,8	0,017	
		102,6	0,023	
		107,3	0,022	
		87,4	0,027	
40	29,2	90,8	0,026	0,030
		87,4	0,027	
		71,5	0,033	
		69,4	0,034	
		76,1	0,031	
40	33,3	84,3	0,028	0,031
		69,4	0,034	
		67,4	0,035	
		78,7	0,030	
		81,4	0,029	

Таблица Б.4 – Экспериментальные данные зависимости скорости вибротранспортирования v от диаметра перфорации \varnothing и частоты колебаний f (смесь №1, $l_{cp}=2,36$ м, $\beta=45^\circ$, $A=4,5$ мм, ВКС=20 мм)

Диаметр перфорации \varnothing , мм	Частота колебаний f , Гц	Время перемещения частицы-индикатора t_d , с	Скорость вибротранспортирования v , м/с	Среднее значение скорости вибротранспортирования v_{cp} , м/с
1	2	3	4	5
0	16,6	94,4	0,025	0,027
		81,4	0,029	
		87,4	0,027	
		94,4	0,025	
		87,4	0,027	
0	20,8	78,7	0,030	0,032
		73,8	0,032	
		65,6	0,036	
		81,4	0,029	
		71,5	0,033	
0	25,0	54,9	0,043	0,047
		48,2	0,049	
		52,4	0,045	
		50,2	0,047	
		49,2	0,048	
0	29,2	38,1	0,062	0,063
		37,5	0,063	
		35,2	0,067	
		36,3	0,065	
		39,3	0,060	
0	33,3	24,3	0,097	0,094
		25,1	0,094	
		26,2	0,090	
		24,8	0,095	
		25,1	0,094	
5	16,6	17,7	0,133	0,129
		19,2	0,123	
		18,9	0,125	
		17,6	0,134	
		18,3	0,129	
5	20,8	20,3	0,116	0,116
		20,5	0,115	
		21,5	0,110	
		19,7	0,120	
		20,2	0,117	

1	2	3	4	5
5	25,0	14,8	0,160	0,162
		15,0	0,157	
		14,2	0,166	
		14,0	0,168	
		14,8	0,160	
5	29,2	12,4	0,190	0,198
		11,9	0,199	
		11,6	0,203	
		11,9	0,198	
		11,8	0,200	
5	33,3	7,8	0,303	0,309
		7,6	0,311	
		7,6	0,310	
		7,7	0,307	
		7,6	0,312	
7	16,6	18,6	0,127	0,129
		18,0	0,131	
		18,3	0,129	
		18,4	0,128	
		18,2	0,130	
7	20,8	20,5	0,115	0,119
		20,2	0,117	
		20,2	0,117	
		18,9	0,125	
		19,7	0,120	
7	25,0	11,2	0,210	0,215
		10,8	0,219	
		11,0	0,215	
		11,1	0,213	
		10,8	0,218	
7	29,2	9,0	0,263	0,262
		9,0	0,262	
		9,1	0,258	
		9,0	0,263	
		8,9	0,266	
7	33,3	5,7	0,415	0,414
		5,8	0,410	
		5,7	0,416	
		5,8	0,409	
		5,6	0,418	

Таблица Б.5 – Экспериментальные данные зависимости скорости вибротранспортирования v от сыпучести компонента и частоты колебаний f (смесь №1, $l_{cp}=2,36$ м, $\beta=45^\circ$, $A=4,5$ мм, ВКС=20 мм)

Сыпучесть компонента	Частота колебаний f , Гц	Время перемещения частицы-индикатора $t_{л}$, с	Скорость вибротранспортирования v , м/с	Среднее значение скорости вибротранспортирования v_{cp} , м/с
1	2	3	4	5
Мука пшеничная	16,6	40,7	0,058	0,066
		34,7	0,068	
		34,2	0,069	
		35,2	0,067	
		36,9	0,064	
Мука пшеничная	20,8	30,6	0,077	0,076
		31,1	0,076	
		31,1	0,076	
		32,3	0,073	
		30,3	0,078	
Мука пшеничная	25,0	21,5	0,110	0,112
		20,5	0,115	
		21,9	0,108	
		21,1	0,112	
		20,9	0,113	
Мука пшеничная	29,2	18,0	0,131	0,131
		18,4	0,128	
		18,6	0,127	
		17,7	0,133	
		17,5	0,135	
Мука пшеничная	33,3	14,8	0,160	0,162
		15,0	0,157	
		14,4	0,164	
		14,2	0,166	
		14,7	0,161	
Сахар-песок	16,6	15,4	0,153	0,157
		15,4	0,153	
		14,8	0,159	
		14,6	0,162	
		15,0	0,157	
Сахар-песок	20,8	13,6	0,174	0,175
		13,2	0,179	
		13,7	0,172	
		13,3	0,177	
		13,5	0,175	

1	2	3	4	5
Сахар-песок	25,0	12,3	0,192	0,191
		12,0	0,196	
		12,6	0,187	
		12,5	0,189	
		12,2	0,193	
Сахар-песок	29,2	10,1	0,233	0,235
		10,3	0,230	
		9,9	0,238	
		10,0	0,237	
		10,0	0,235	
Сахар-песок	33,3	9,1	0,259	0,261
		9,2	0,257	
		9,0	0,263	
		8,9	0,265	
		9,0	0,262	
Соль поваренная	16,6	21,5	0,110	0,113
		20,5	0,115	
		20,2	0,117	
		21,1	0,112	
		21,3	0,111	
Соль поваренная	20,8	14,0	0,168	0,170
		13,9	0,170	
		13,7	0,172	
		14,0	0,169	
		13,9	0,170	
Соль поваренная	25,0	12,3	0,192	0,191
		12,5	0,189	
		12,4	0,190	
		12,2	0,193	
		12,4	0,191	
Соль поваренная	29,2	10,6	0,223	0,224
		10,4	0,227	
		10,7	0,220	
		10,4	0,226	
		10,6	0,222	
Соль поваренная	33,3	10,5	0,225	0,227
		10,4	0,227	
		10,2	0,231	
		10,6	0,223	
		10,5	0,224	

Приложение В

Таблица В.1 – Экспериментальные данные зависимости расхода мучной сыпучей смеси через отверстия $m_{отв}$ от высоты ВКС и частоты колебаний f (смесь №1, $t=60$ с, $\beta=45^\circ$, $A=4,5$ мм, $\varnothing=7$ мм)

Высота ВКС, мм	Частота колебаний f , Гц	Масса пробы m , кг	Расход через отверстие $m_{отв}$, кг/с	Среднее значение расхода через отверстие $m_{отв\text{ср}}$, кг/с
1	2	3	4	5
20	16,6	0,17	0,0029	0,0033
		0,21	0,0035	
		0,19	0,0032	
		0,20	0,0034	
		0,20	0,0033	
20	20,8	0,22	0,0037	0,0038
		0,23	0,0038	
		0,22	0,0036	
		0,23	0,0039	
		0,23	0,0038	
20	25,0	0,25	0,0042	0,0041
		0,24	0,0040	
		0,25	0,0041	
		0,23	0,0038	
		0,26	0,0043	
20	29,2	0,23	0,0038	0,0039
		0,23	0,0039	
		0,22	0,0036	
		0,25	0,0041	
		0,23	0,0039	
20	33,3	0,20	0,0033	0,0031
		0,16	0,0027	
		0,19	0,0032	
		0,19	0,0031	
		0,18	0,0030	
30	16,6	0,21	0,0035	0,0036
		0,22	0,0037	
		0,23	0,0038	
		0,20	0,0034	
		0,22	0,0036	
30	20,8	0,27	0,0045	0,0046
		0,28	0,0046	
		0,28	0,0046	
		0,29	0,0048	

1	2	3	4	5
30	25,0	0,29	0,0049	0,0047
		0,30	0,0050	
		0,27	0,0045	
		0,28	0,0046	
		0,26	0,0044	
30	29,2	0,25	0,0041	0,0043
		0,24	0,0040	
		0,23	0,0039	
		0,28	0,0046	
		0,28	0,0047	
30	33,3	0,24	0,0040	0,0041
		0,23	0,0039	
		0,26	0,0043	
		0,26	0,0044	
		0,25	0,0041	
40	16,6	0,25	0,0041	0,0041
		0,26	0,0044	
		0,25	0,0041	
		0,26	0,0043	
		0,22	0,0037	
40	20,8	0,28	0,0046	0,0048
		0,26	0,0044	
		0,31	0,0052	
		0,30	0,0050	
		0,29	0,0048	
40	25,0	0,30	0,0050	0,0054
		0,31	0,0052	
		0,32	0,0054	
		0,34	0,0057	
		0,33	0,0055	
40	29,2	0,28	0,0047	0,0049
		0,31	0,0052	
		0,29	0,0049	
		0,31	0,0051	
		0,28	0,0046	
40	33,3	0,26	0,0043	0,0044
		0,28	0,0046	
		0,26	0,0044	
		0,25	0,0042	
		0,27	0,0045	

Таблица В.2 – Экспериментальные данные зависимости расхода мучной сыпучей смеси через отверстия $m_{омв}$ от амплитуды A и частоты колебаний f (смесь №1, $t=60$ с, $\beta=45^\circ$, ВКС=20 мм, $\varnothing=7$ мм)

Амплитуда колебаний A , мм	Частота колебаний f , Гц	Масса пробы m , кг	Расход через отверстие $m_{омв}$, кг/с	Среднее значение расхода через отверстие $m_{омвср}$, кг/с
1	2	3	4	5
2,5	16,6	0,16	0,0026	0,0028
		0,19	0,0031	
		0,16	0,0027	
		0,17	0,0028	
		0,18	0,0030	
2,5	20,8	0,19	0,0032	0,0032
		0,18	0,0030	
		0,17	0,0029	
		0,20	0,0033	
		0,20	0,0034	
2,5	25,0	0,21	0,0035	0,0037
		0,22	0,0037	
		0,25	0,0041	
		0,22	0,0036	
		0,22	0,0037	
2,5	29,2	0,14	0,0023	0,0025
		0,16	0,0027	
		0,14	0,0024	
		0,15	0,0025	
		0,16	0,0026	
2,5	33,3	0,18	0,0030	0,0032
		0,20	0,0034	
		0,18	0,0030	
		0,20	0,0033	
		0,19	0,0032	
3,5	16,6	0,15	0,0025	0,0023
		0,11	0,0018	
		0,15	0,0025	
		0,14	0,0023	
		0,13	0,0022	
3,5	20,8	0,15	0,0025	0,0027
		0,14	0,0023	
		0,17	0,0029	
		0,18	0,0030	
		0,16	0,0026	

1	2	3	4	5
3,5	25,0	0,17	0,0029	0,0031
		0,21	0,0035	
		0,17	0,0028	
		0,19	0,0031	
		0,20	0,0033	
3,5	29,2	0,17	0,0028	0,0028
		0,16	0,0026	
		0,19	0,0032	
		0,16	0,0027	
		0,17	0,0028	
3,5	33,3	0,15	0,0025	0,0026
		0,14	0,0023	
		0,16	0,0027	
		0,16	0,0026	
		0,17	0,0028	
4,5	16,6	0,19	0,0032	0,0033
		0,22	0,0036	
		0,20	0,0034	
		0,18	0,0030	
		0,20	0,0033	
4,5	20,8	0,23	0,0038	0,0038
		0,22	0,0036	
		0,24	0,0040	
		0,23	0,0038	
		0,23	0,0039	
4,5	25,0	0,25	0,0041	0,0041
		0,26	0,0043	
		0,23	0,0039	
		0,25	0,0041	
		0,24	0,0040	
4,5	29,2	0,22	0,0037	0,0039
		0,25	0,0041	
		0,23	0,0038	
		0,23	0,0039	
		0,24	0,0040	
4,5	33,3	0,18	0,0030	0,0031
		0,17	0,0028	
		0,20	0,0033	
		0,19	0,0032	
		0,19	0,0031	

Таблица В.3 – Экспериментальные данные зависимости расхода мучной сыпучей смеси через отверстия $m_{отв}$ от угла β и частоты колебаний f (смесь №1, $t=60$ с, $A=4,5$ мм, ВКС=20 мм, $\varnothing=7$ мм)

Угол колебаний $\beta, ^\circ$	Частота колебаний $f, \text{Гц}$	Масса пробы $m, \text{кг}$	Расход через отверстие $m_{отв}, \text{кг/с}$	Среднее значение расхода через отверстие $m_{отв\text{ср}}, \text{кг/с}$
1	2	3	4	5
30	16,6	0,23	0,0039	0,0041
		0,24	0,0040	
		0,25	0,0041	
		0,25	0,0041	
		0,26	0,0043	
30	20,8	0,28	0,0047	0,0048
		0,29	0,0049	
		0,31	0,0051	
		0,30	0,0050	
		0,29	0,0048	
30	25,0	0,31	0,0052	0,0054
		0,34	0,0056	
		0,32	0,0054	
		0,33	0,0055	
		0,32	0,0054	
30	29,2	0,29	0,0048	0,049
		0,29	0,0049	
		0,31	0,0051	
		0,30	0,0050	
		0,29	0,0049	
30	33,3	0,26	0,0043	0,0044
		0,25	0,0042	
		0,27	0,0045	
		0,28	0,0046	
		0,26	0,0044	
45	16,6	0,10	0,0017	0,0020
		0,11	0,0019	
		0,13	0,0022	
		0,14	0,0023	
		0,12	0,0020	
45	20,8	0,13	0,0021	0,0023
		0,14	0,0023	
		0,14	0,0023	
		0,15	0,0025	
		0,13	0,0022	

1	2	3	4	5
45	25,0	0,15	0,0025	0,0024
		0,16	0,0026	
		0,13	0,0021	
		0,16	0,0027	
		0,12	0,0020	
45	29,2	0,15	0,0025	0,0023
		0,14	0,0023	
		0,14	0,0023	
		0,11	0,0019	
		0,14	0,0024	
45	33,3	0,12	0,0020	0,0022
		0,13	0,0022	
		0,14	0,0024	
		0,13	0,0021	
		0,13	0,0022	
60	16,6	0,08	0,0013	0,0015
		0,09	0,0015	
		0,10	0,0017	
		0,09	0,0015	
		0,08	0,0014	
60	20,8	0,10	0,0016	0,0017
		0,11	0,0018	
		0,10	0,0017	
		0,09	0,0015	
		0,11	0,0019	
60	25,0	0,11	0,0018	0,0018
		0,11	0,0019	
		0,10	0,0017	
		0,10	0,0016	
		0,11	0,0018	
60	29,2	0,09	0,0015	0,0017
		0,10	0,0017	
		0,10	0,0016	
		0,11	0,0019	
		0,10	0,0017	
60	33,3	0,10	0,0016	0,0016
		0,08	0,0014	
		0,11	0,0018	
		0,10	0,0017	
		0,09	0,0015	

Таблица В.4 – Экспериментальные данные зависимости расхода мучной сыпучей смеси через отверстия $m_{отв}$ от диаметра перфорации \varnothing и частоты колебаний f (смесь №1, $t=60$ с, $\beta=45^\circ$, $A=4,5$ мм, ВКС=20 мм)

Диаметр перфорации \varnothing , мм	Частота колебаний f , Гц	Масса пробы m , кг	Расход через отверстие $m_{отв}$, кг/с	Среднее значение расхода через отверстие $m_{отв\text{ср}}$, кг/с
1	2	3	4	5
7	16,6	0,26	0,0043	0,0041
		0,23	0,0039	
		0,25	0,0041	
		0,25	0,0042	
		0,23	0,0038	
7	20,8	0,30	0,0050	0,0048
		0,28	0,0047	
		0,29	0,0048	
		0,29	0,0049	
		0,28	0,0046	
7	25,0	0,32	0,0054	0,0054
		0,34	0,0056	
		0,31	0,0052	
		0,30	0,0050	
		0,34	0,0057	
7	29,2	0,30	0,0050	0,0049
		0,28	0,0047	
		0,29	0,0049	
		0,29	0,0048	
		0,31	0,0052	
7	33,3	0,26	0,0043	0,0044
		0,26	0,0044	
		0,24	0,0040	
		0,28	0,0046	
		0,27	0,0045	
10	16,6	0,29	0,0049	0,0048
		0,28	0,0047	
		0,29	0,0048	
		0,30	0,0050	
		0,28	0,0046	
10	20,8	0,30	0,0050	0,0054
		0,34	0,0056	
		0,32	0,0054	
		0,32	0,0054	
		0,33	0,0055	

1	2	3	4	5
10	25,0	0,32	0,0054	0,0056
		0,35	0,0058	
		0,34	0,0057	
		0,33	0,0055	
		0,34	0,0056	
10	29,2	0,31	0,0052	0,0052
		0,29	0,0049	
		0,30	0,0050	
		0,32	0,0053	
		0,33	0,0055	
10	33,3	0,28	0,0047	0,0048
		0,29	0,0049	
		0,29	0,0049	
		0,31	0,0051	
		0,28	0,0046	

Приложение Г

Таблица Г.1 – Экспериментальные данные зависимости потребляемой мощности (N) вибросмесителя с рецикл каналом массой 16,5 кг от амплитуды A и частоты колебаний f ($U=220$ В, $\beta=45^\circ$, ВКС=20 мм, $\varnothing=7$ мм)

Амплитуда колебаний A , мм	Частота колебаний f , Гц	Сила тока I , А	Потребляемая мощность N , кВт
2,5	16,6	0,7	0,1431
2,5	20,8	0,9	0,1982
2,5	25,0	1,3	0,2750
2,5	29,2	1,4	0,3080
2,5	33,3	1,8	0,4000
3,5	16,6	0,7	0,1431
3,5	20,8	0,9	0,1989
3,5	25,0	1,3	0,2770
3,5	29,2	1,5	0,3264
3,5	33,3	2,3	0,5000
4,5	16,6	0,7	0,1431
4,5	20,8	0,9	0,1997
4,5	25,0	1,3	0,2790
4,5	29,2	1,6	0,3616
4,5	33,3	2,5	0,5540

Таблица Г.2 – Экспериментальные данные зависимости потребляемой мощности (N) вибросмесителя с рецикл каналом массой 25,5 кг от амплитуды A и частоты колебаний f ($U=220$ В, $\beta=45^\circ$, ВКС=20 мм, $\varnothing=7$ мм)

Амплитуда колебаний A , мм	Частота колебаний f , Гц	Сила тока I , А	Потребляемая мощность N , кВт
1	2	3	4
2,5	16,6	0,7	0,1564
2,5	20,8	0,7	0,1571
2,5	25,0	0,8	0,1869
2,5	29,2	1,0	0,2232
2,5	33,3	1,8	0,3856

Продолжение таблицы Г.2

1	2	3	4
3,5	16,6	0,7	0,1564
3,5	20,8	0,7	0,1573
3,5	25,0	0,9	0,2000
3,5	29,2	1,4	0,3021
3,5	33,3	1,8	0,4058
4,5	16,6	0,7	0,1564
4,5	20,8	0,7	0,1584
4,5	25,0	1,2	0,2679
4,5	29,2	1,7	0,3821
4,5	33,3	2,5	0,5490

Приложение Д

Таблица Д.1 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=30^\circ$, $A=2,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
23,49	23,34	0,15	0,0064267	14,06
22,87	22,68	0,19	0,0083774	12,38
33,25	33,07	0,18	0,0054430	14,91
23,49	21,53	1,96	0,0910358	58,98
22,87	22,72	0,15	0,0066021	13,91
33,25	33,08	0,17	0,0051391	15,17
32,00	31,86	0,14	0,0043942	15,82
17,09	16,11	0,98	0,0608318	32,91
24,26	24,15	0,11	0,0045549	15,68
28,98	28,81	0,17	0,0059007	14,52
24,26	22,77	1,49	0,0654370	36,88
28,98	28,81	0,17	0,0059007	14,52
33,02	31,04	1,98	0,0637887	35,46
33,18	31,62	1,56	0,0493359	22,98
20,06	19,94	0,12	0,0060181	14,42
39,09	38,74	0,35	0,0090346	11,81
17,09	16,93	0,16	0,0094507	11,45
22,79	22,66	0,13	0,0057370	14,66
23,49	23,37	0,12	0,0051348	15,18
22,82	22,75	0,07	0,0030769	16,96
23,49	23,37	0,12	0,0051348	15,18
20,06	19,87	0,19	0,0095622	11,36
39,09	38,97	0,12	0,0030793	16,95
17,09	15,51	1,58	0,1018698	68,33
20,06	19,87	0,19	0,0095622	11,36
39,09	37,12	1,97	0,0530711	26,21
17,09	16,93	0,16	0,0094507	11,45
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				20,87

Таблица Д.2 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=60^\circ$, $A=2,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
37,26	37,18	0,08	0,0021517	18,46
20,68	18,92	1,76	0,0930233	30,17
35,98	35,91	0,07	0,0019493	18,57
20,06	19,90	0,16	0,0080402	15,31
35,98	33,20	2,78	0,0837349	25,20
20,06	17,80	2,26	0,1269663	48,34
36,09	35,93	0,16	0,0044531	17,23
34,00	32,02	1,98	0,0618364	13,48
23,30	23,19	0,11	0,0047434	17,07
37,09	36,94	0,15	0,0040606	17,44
37,26	37,07	0,19	0,0051254	16,87
20,68	20,52	0,16	0,0077973	15,44
35,98	35,87	0,11	0,0030666	17,97
20,06	19,95	0,11	0,0055138	16,66
37,26	34,56	2,70	0,0781250	22,20
20,68	20,60	0,08	0,0038835	17,53
39,68	39,56	0,12	0,0030334	17,99
20,06	19,95	0,11	0,0055138	16,66
37,26	37,11	0,15	0,0040420	17,45
20,68	17,71	2,97	0,1677019	70,14
29,65	29,55	0,10	0,0033841	17,80
28,84	28,75	0,09	0,0031304	17,94
20,06	17,31	2,75	0,1588677	65,41
37,26	37,19	0,07	0,0018822	18,60
20,68	18,12	2,56	0,1412804	56,00
29,65	29,57	0,08	0,0027054	18,16
20,68	20,61	0,07	0,0033964	17,79
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				25,46

Таблица Д.3 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=45^\circ$, $A=2,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
26,75	25,33	1,42	0,0560600	31,43
23,49	22,70	0,79	0,0348018	12,08
22,26	22,10	0,16	0,0072398	13,02
22,16	21,38	0,78	0,0364827	13,61
33,49	33,34	0,15	0,0044991	15,51
32,16	32,00	0,16	0,0050000	15,06
38,89	38,79	0,10	0,0025780	17,26
19,58	18,60	0,98	0,0526882	28,36
22,82	21,33	1,49	0,0698547	44,00
32,37	31,78	0,59	0,0185651	2,71
36,89	34,00	2,89	0,0850000	57,79
32,56	31,30	1,26	0,0402556	17,04
22,82	21,23	1,59	0,0748940	48,58
33,18	32,55	0,63	0,0193548	1,99
22,16	22,01	0,15	0,0068151	13,41
31,56	31,40	0,16	0,0050955	14,97
36,49	36,40	0,09	0,0024725	17,36
32,35	32,19	0,16	0,0049705	15,09
26,78	26,69	0,09	0,0033720	16,54
36,98	36,82	0,16	0,0043455	15,65
32,35	32,21	0,14	0,0043465	15,65
32,25	31,50	0,75	0,0238095	2,07
26,89	26,78	0,11	0,0041075	15,87
36,94	36,78	0,16	0,0043502	15,65
32,35	32,25	0,10	0,0031008	16,79
22,16	22,08	0,08	0,0036232	16,31
36,57	36,43	0,14	0,0038430	16,11
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				18,89

Таблица Д.4 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=30^\circ$, $A=4,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
23,27	23,09	0,18	0,0077956	15,56
24,99	24,80	0,19	0,0076613	15,63
30,15	28,40	1,75	0,0616197	12,45
20,59	20,13	0,46	0,0228515	7,72
37,98	37,55	0,43	0,0114514	13,65
32,79	31,37	1,42	0,0452662	3,94
25,64	25,38	0,26	0,0102443	14,28
20,45	18,48	1,97	0,1066017	35,85
20,87	19,31	1,56	0,0807872	22,42
18,13	16,38	1,75	0,1068376	35,97
26,87	25,52	1,35	0,0528997	7,91
24,91	23,93	0,98	0,0409528	1,69
19,86	18,15	1,71	0,0942149	29,40
22,59	22,38	0,21	0,0093834	14,73
21,38	19,67	1,71	0,0869344	25,62
20,92	19,31	1,61	0,0833765	23,76
21,12	20,67	0,45	0,0217707	8,29
35,09	34,77	0,32	0,0092033	14,82
21,53	21,37	0,16	0,0074871	15,72
20,89	20,00	0,89	0,0445000	3,54
25,49	24,85	0,64	0,0257545	6,21
24,41	24,20	0,21	0,0086777	15,10
20,83	20,55	0,28	0,0136253	12,52
21,98	21,72	0,26	0,0119700	13,38
13,79	13,54	0,25	0,0184638	10,01
36,86	36,11	0,75	0,0207699	8,81
24,02	23,86	0,16	0,0067058	16,12
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				15,04

Таблица Д.5 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=60^\circ$, $A=4,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
32,00	31,85	0,15	0,0047096	14,43
22,90	22,71	0,19	0,0083664	10,41
20,06	19,91	0,15	0,0075339	11,33
23,49	21,53	1,96	0,0910358	80,48
28,84	28,69	0,15	0,0052283	13,86
36,09	35,92	0,17	0,0047327	14,41
34,00	33,86	0,14	0,0041347	15,07
23,30	22,32	0,98	0,0439068	28,66
26,79	26,68	0,11	0,0041229	15,08
38,06	37,91	0,15	0,0039567	15,26
37,56	37,37	0,19	0,0050843	14,02
40,98	40,80	0,18	0,0044118	14,76
29,06	27,10	1,96	0,0723247	59,91
39,68	39,53	0,15	0,0037946	15,44
38,09	38,00	0,09	0,0023684	17,01
22,00	21,88	0,12	0,0054845	13,58
33,00	32,81	0,19	0,0057909	13,24
29,65	29,53	0,12	0,0040637	15,14
26,78	25,2	1,58	0,0626984	49,32
22,82	22,75	0,07	0,0030769	16,23
23,49	23,37	0,12	0,0051348	13,97
23,04	22,85	0,19	0,0083151	10,47
37,09	36,97	0,12	0,0032459	16,04
35,98	34,40	1,58	0,0459302	30,89
20,06	19,89	0,17	0,0085470	10,21
37,26	35,29	1,97	0,0558232	41,76
20,68	20,52	0,16	0,0077973	11,04
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				21,54

Таблица Д.6 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=45^\circ$, $A=4,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
17,29	16,31	0,98	0,0600858	23,43
17,99	17,21	0,78	0,0453225	12,85
20,11	19,36	0,75	0,0387397	8,14
18,56	17,92	0,64	0,0357143	5,97
27,78	27,36	0,42	0,0153509	8,62
21,89	21,65	0,24	0,0110855	11,67
17,44	16,82	0,62	0,0368609	6,79
20,45	19,67	0,78	0,0396543	8,79
20,87	19,88	0,99	0,0497988	16,06
19,13	18,14	0,99	0,0545755	19,48
17,57	17,04	0,53	0,0311033	2,67
18,61	17,72	0,89	0,0502257	16,37
19,86	19,68	0,18	0,0091463	13,06
21,59	21,36	0,23	0,0107678	11,90
21,31	21,14	0,17	0,0080416	13,85
18,52	18,38	0,14	0,0076170	14,16
20,12	19,23	0,89	0,0462819	13,54
46,09	45,89	0,20	0,0043582	16,49
21,53	21,38	0,15	0,0070159	14,59
18,89	17,91	0,98	0,0547180	19,58
19,46	18,48	0,98	0,0530303	18,38
20,41	20,19	0,22	0,0108965	11,81
19,03	18,82	0,21	0,0111583	11,62
18,41	18,21	0,20	0,0109830	11,74
29,09	28,85	0,24	0,0083189	13,65
40,76	39,87	0,89	0,0223225	3,62
25,02	24,87	0,15	0,0060314	15,29
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				12,83

Таблица Д.7 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=30^\circ$, $A=3,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
34,49	34,33	0,16	0,0046606	15,31
22,82	22,59	0,23	0,0101815	10,22
22,16	22,07	0,09	0,0040779	15,85
36,59	36,45	0,14	0,0038409	16,07
22,82	22,67	0,15	0,0066167	13,51
22,16	22,00	0,16	0,0072727	12,90
22,79	22,69	0,10	0,0044072	15,55
22,82	21,04	1,78	0,0846008	58,42
22,16	21,37	0,79	0,0369677	14,49
22,82	22,67	0,15	0,0066167	13,51
33,18	33,02	0,16	0,0048455	15,14
36,49	36,39	0,10	0,0027480	17,08
22,82	22,03	0,79	0,0358602	13,47
33,18	31,62	1,56	0,0493359	25,90
22,16	20,37	1,79	0,0878743	61,44
31,56	31,41	0,15	0,0047755	15,21
36,59	36,47	0,12	0,0032904	16,58
22,79	22,66	0,13	0,0057370	14,32
23,49	23,26	0,23	0,0098882	10,49
22,82	22,73	0,09	0,0039595	15,96
22,16	22,02	0,14	0,0063579	13,75
31,58	30,79	0,79	0,0256577	4,05
32,35	30,57	1,78	0,0582270	34,10
22,79	20,96	1,83	0,0873092	60,92
31,58	31,47	0,11	0,0034954	16,39
32,35	32,19	0,16	0,0049705	15,03
22,16	21,93	0,23	0,0104879	9,94
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				20,22

Таблица Д.8 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=60^\circ$, $A=3,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
36,09	36,01	0,08	0,0022216	17,81
34,00	32,13	1,87	0,0582011	27,54
23,30	23,20	0,10	0,0043103	16,12
37,09	36,94	0,15	0,0040606	16,32
35,98	35,79	0,19	0,0053087	15,31
20,06	18,09	1,97	0,1088999	68,61
37,26	37,10	0,16	0,0043127	16,12
20,68	19,70	0,98	0,0497462	20,69
26,79	26,68	0,11	0,0041229	16,27
38,06	37,91	0,15	0,0039567	16,41
37,26	37,07	0,19	0,0051254	15,46
20,68	20,50	0,18	0,0087805	12,50
35,98	34,02	1,96	0,0576132	27,06
20,06	18,59	1,47	0,0790748	44,45
37,26	37,18	0,08	0,0021517	17,87
20,68	20,56	0,12	0,0058366	14,88
39,68	39,52	0,16	0,0040486	16,33
20,06	19,95	0,11	0,0055138	15,14
37,26	37,11	0,15	0,0040420	16,34
20,68	20,56	0,12	0,0058366	14,88
29,65	29,57	0,08	0,0027054	17,42
28,84	26,86	1,98	0,0737156	40,11
37,09	35,12	1,97	0,0560934	25,83
35,98	35,86	0,12	0,0033463	16,90
20,06	18,50	1,56	0,0843243	48,70
37,26	37,15	0,11	0,0029610	17,21
20,68	20,53	0,15	0,0073064	13,69
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				22,4

Таблица Д.9 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=45^\circ$, $A=3,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
36,89	35,55	1,34	0,0376934	25,86
32,56	31,77	0,79	0,0248662	10,38
22,82	22,66	0,16	0,0070609	11,09
32,35	31,57	0,78	0,0247070	10,19
22,16	22,01	0,15	0,0068151	11,39
33,56	33,40	0,16	0,0047904	13,83
22,79	22,69	0,10	0,0044072	14,30
23,49	22,07	1,42	0,0643407	58,00
22,82	22,03	0,79	0,0358602	23,65
22,16	22,00	0,16	0,0072727	10,84
31,56	30,78	0,78	0,0253411	10,96
36,49	36,23	0,26	0,0071764	10,95
22,82	21,23	1,59	0,0748940	70,73
33,18	32,55	0,63	0,0193548	3,74
22,16	22,01	0,15	0,0068151	11,39
31,56	31,40	0,16	0,0050955	13,46
36,52	35,77	0,75	0,0209673	5,68
36,94	36,83	0,11	0,0029867	16,01
32,35	32,26	0,09	0,0027898	16,25
36,95	36,79	0,16	0,0043490	14,37
32,35	32,21	0,14	0,0043465	14,37
32,25	31,50	0,75	0,0238095	9,11
26,89	26,78	0,11	0,0041075	14,66
36,99	36,83	0,16	0,0043443	14,37
32,35	32,25	0,10	0,0031008	15,87
22,16	22,00	0,16	0,0072727	10,84
36,59	36,43	0,16	0,0043920	14,31
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				16,88

Таблица Д.10 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=30^\circ$, $A=2,5$ мм, $f=33,3$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
21,27	21,05	0,22	0,0104513	14,02
23,99	23,80	0,19	0,0079832	15,34
28,25	26,83	1,42	0,0529258	8,73
20,59	19,93	0,66	0,0331159	1,88
37,88	37,45	0,43	0,0114820	13,46
40,97	40,55	0,42	0,0103576	14,07
26,65	26,41	0,24	0,0090875	14,75
20,45	18,80	1,65	0,0877660	27,38
20,87	19,43	1,44	0,0741122	20,07
18,13	17,01	1,12	0,0658436	15,64
27,77	26,46	1,31	0,0495087	6,90
25,91	24,68	1,23	0,0498379	7,07
19,86	18,32	1,54	0,0840611	25,40
22,59	22,37	0,22	0,0098346	14,35
20,38	18,65	1,73	0,0927614	30,05
18,91	17,30	1,61	0,0930636	30,22
21,12	20,67	0,45	0,0217707	7,96
25,09	24,77	0,32	0,0129189	12,69
21,53	21,36	0,17	0,0079588	15,35
20,89	20,00	0,89	0,0445000	4,21
25,50	25,11	0,39	0,0155317	11,30
24,42	23,21	1,21	0,0521327	8,30
26,84	25,99	0,85	0,0327049	2,10
21,89	21,44	0,45	0,0209888	8,37
26,79	26,55	0,24	0,0090395	14,77
46,57	45,63	0,94	0,0206005	8,58
22,22	22,03	0,19	0,0086246	14,99
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				13,64

Таблица Д.11 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=60^\circ$, $A=2,5$ мм, $f=33,3$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
22,79	22,63	0,16	0,0070703	12,22
36,59	36,36	0,23	0,0063256	13,00
22,82	22,73	0,09	0,0039595	15,47
36,59	36,45	0,14	0,0038409	15,60
22,16	22,01	0,15	0,0068151	12,49
33,56	33,40	0,16	0,0047904	14,60
22,79	22,69	0,10	0,0044072	15,00
22,82	21,04	1,78	0,0846008	68,83
22,16	21,37	0,79	0,0369677	19,03
22,82	22,67	0,15	0,0066167	12,69
33,18	33,02	0,16	0,0048455	14,55
36,49	35,74	0,75	0,0209849	2,33
22,82	21,23	1,59	0,0748940	58,68
33,18	33,10	0,08	0,0024169	17,09
22,16	22,01	0,15	0,0068151	12,49
31,56	31,43	0,13	0,0041362	15,29
36,59	35,84	0,75	0,0209263	2,26
22,79	22,63	0,16	0,0070703	12,22
23,49	23,26	0,23	0,0098882	9,27
22,82	22,73	0,09	0,0039595	15,47
22,16	22,02	0,14	0,0063579	12,97
31,58	30,79	0,79	0,0256577	7,21
32,35	30,79	1,56	0,0506658	33,35
22,16	20,37	1,79	0,0878743	72,25
33,56	33,41	0,15	0,0044897	14,92
22,89	22,74	0,15	0,0065963	12,72
36,59	36,46	0,13	0,0035656	15,88
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				19,49

Таблица Д.12 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=45^\circ$, $A=2,5$ мм, $f=33,3$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
21,35	21,09	0,26	0,0123281	10,29
23,79	23,50	0,29	0,0123404	10,28
28,27	27,31	0,96	0,0351520	6,96
20,59	19,95	0,64	0,0320802	4,64
37,56	37,10	0,46	0,0123989	10,24
40,84	40,26	0,58	0,0144064	8,72
26,54	25,85	0,69	0,0266925	0,56
20,68	20,45	0,23	0,0112469	11,11
20,87	19,84	1,03	0,0519153	19,63
18,14	17,06	1,08	0,0633060	28,24
27,56	26,58	0,98	0,0368698	8,26
25,85	25,29	0,56	0,0221431	2,88
19,83	19,67	0,16	0,0081342	13,46
22,71	21,93	0,78	0,0355677	7,27
20,49	18,86	1,63	0,0864263	45,71
18,93	18,81	0,12	0,0063796	14,79
21,15	20,66	0,49	0,0237173	1,69
25,98	25,46	0,52	0,0204242	4,17
21,54	20,85	0,69	0,0330935	5,40
20,26	19,90	0,36	0,0180905	5,94
25,56	25,15	0,41	0,0163022	7,29
24,65	23,80	0,85	0,0357143	7,38
26,85	26,40	0,45	0,0170455	6,73
21,77	20,88	0,89	0,0426245	12,61
26,64	26,41	0,23	0,0087088	13,03
46,67	46,13	0,54	0,0117060	10,76
22,69	22,56	0,13	0,0057624	15,26
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				10,83

Таблица Д.13 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=30^\circ$, $A=4,5$ мм, $f=33,3$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
19,59	17,40	2,19	0,1258621	9,49
20,89	19,30	1,59	0,0823834	0,56
26,89	24,63	2,26	0,0917580	1,61
23,69	21,20	2,49	0,1174528	7,55
36,56	34,43	2,13	0,0618647	5,31
39,84	38,78	1,06	0,0273337	13,29
22,57	21,08	1,49	0,0706831	3,27
20,28	18,30	1,98	0,1081967	5,41
24,75	22,49	2,26	0,1004891	3,62
18,78	16,32	2,46	0,1507353	15,24
29,63	27,04	2,59	0,0957840	2,54
25,59	24,23	1,36	0,0561288	6,63
21,49	19,90	1,59	0,0798995	1,14
26,98	25,39	1,59	0,0626231	5,13
21,54	18,95	2,59	0,1366755	11,99
18,83	16,67	2,16	0,1295741	10,35
21,53	19,39	2,14	0,1103662	5,91
24,98	22,49	2,49	0,1107159	5,99
21,54	19,85	1,69	0,0851385	0,08
18,28	16,16	2,12	0,1311881	10,72
25,96	23,47	2,49	0,1060929	4,92
25,65	24,06	1,59	0,0660848	4,33
32,59	31,96	0,63	0,0197121	15,05
21,77	20,78	0,99	0,0476420	8,60
31,90	30,41	1,49	0,0489970	8,28
46,67	45,65	1,02	0,0223439	14,45
23,36	22,37	0,99	0,0442557	9,38
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				7,07

Таблица Д.14 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=60^\circ$, $A=3,5$ мм, $f=33,3$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
21,23	21,04	0,19	0,0090304	15,46
24,99	24,81	0,18	0,0072551	16,28
28,15	25,70	2,45	0,0953307	24,19
20,59	18,92	1,67	0,0882664	20,95
37,98	37,55	0,43	0,0114514	14,35
42,97	42,55	0,42	0,0098707	15,08
26,65	26,39	0,26	0,0098522	15,08
20,45	18,48	1,97	0,1066017	29,37
20,87	19,31	1,56	0,0807872	17,51
18,13	16,38	1,75	0,1068376	29,48
27,77	25,44	2,33	0,0915881	22,47
25,91	24,70	1,21	0,0489879	2,90
19,86	18,15	1,71	0,0942149	23,68
22,59	22,38	0,21	0,0093834	15,30
20,38	18,67	1,71	0,0915908	22,47
18,91	17,30	1,61	0,0930636	23,15
21,12	20,67	0,45	0,0217707	9,61
25,09	24,77	0,32	0,0129189	13,68
21,53	21,36	0,17	0,0079588	15,95
20,89	20,00	0,89	0,0445000	0,84
25,49	25,10	0,39	0,0155378	12,47
24,41	24,20	0,21	0,0086777	15,62
26,84	25,99	0,85	0,0327049	4,58
21,98	21,53	0,45	0,0209011	10,01
26,79	26,54	0,25	0,0094197	15,28
46,54	45,76	0,78	0,0170455	11,78
22,02	21,87	0,15	0,0068587	16,46
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				16,05

Таблица Д.15 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=45^\circ$, $A=4,5$ мм, $f=33,3$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
20,68	20,14	0,54	0,0268123	4,51
29,65	28,96	0,69	0,0238260	1,82
28,84	28,12	0,72	0,0256046	3,42
20,68	20,14	0,54	0,0268123	4,51
29,65	28,96	0,69	0,0238260	1,82
20,68	19,96	0,72	0,0360721	12,84
29,65	29,01	0,64	0,0220614	0,23
28,84	28,29	0,55	0,0194415	2,12
20,68	20,03	0,65	0,0324513	9,58
20,68	20,36	0,32	0,0157171	5,47
29,65	29,11	0,54	0,0185503	2,92
20,06	19,70	0,36	0,0182741	3,17
37,26	36,54	0,72	0,0197044	1,89
23,78	23,14	0,64	0,0276577	5,27
37,26	36,67	0,59	0,0160894	5,14
20,68	20,33	0,35	0,0172159	4,13
37,78	37,11	0,67	0,0180544	3,37
20,06	19,52	0,54	0,0276639	5,27
28,84	28,38	0,46	0,0162086	5,03
20,06	19,64	0,42	0,0213849	0,38
37,26	36,61	0,65	0,0177547	3,64
28,84	28,20	0,64	0,0226950	0,80
20,06	19,67	0,39	0,0198271	1,78
37,26	36,70	0,56	0,0152589	5,89
27,56	26,84	0,72	0,0268256	4,52
29,65	29,25	0,40	0,0136752	7,31
17,00	16,68	0,32	0,0191847	2,35
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				4,00

Таблица Д.16 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=30^\circ$, $A=3,5$ мм, $f=33,3$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
19,59	17,94	1,65	0,0919732	3,84
23,00	21,22	1,78	0,0838831	1,77
22,16	19,57	2,59	0,1323454	14,13
26,49	23,00	3,49	0,1517391	19,07
33,16	30,74	2,42	0,0787248	0,46
38,89	37,59	1,30	0,0345837	10,79
26,06	25,09	0,97	0,0386608	9,76
33,09	32,20	0,89	0,0276398	12,57
22,74	20,11	2,63	0,1307807	13,73
22,03	19,14	2,89	0,1509927	18,88
23,58	21,53	2,05	0,0952160	4,66
22,95	22,39	0,56	0,0250112	13,24
36,56	34,00	2,56	0,0752941	0,42
29,09	28,50	0,59	0,0207018	14,33
39,03	38,05	0,98	0,0257556	13,05
34,54	33,38	1,16	0,0347513	10,75
31,21	28,72	2,49	0,0866992	2,49
23,56	20,15	3,41	0,1692308	23,53
26,49	25,33	1,16	0,0457955	7,94
20,16	15,80	4,36	0,2759494	50,74
31,56	29,97	1,59	0,0530531	6,09
33,58	31,49	2,09	0,0663703	2,69
26,78	25,68	1,10	0,0428349	8,69
32,35	31,82	0,53	0,0166562	15,37
36,49	35,60	0,89	0,0250000	13,24
39,59	38,50	1,09	0,0283117	12,39
38,09	35,63	2,46	0,0690429	2,01
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				11,4

Таблица Д.17 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=60^\circ$, $A=3,5$ мм, $f=33,3$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
31,56	31,42	0,14	0,0044558	16,68
36,59	35,80	0,79	0,0220670	5,10
22,79	21,01	1,78	0,0847216	36,09
23,49	21,66	1,83	0,0844875	35,93
22,87	22,76	0,11	0,0048330	16,43
33,25	33,09	0,16	0,0048353	16,43
32,00	31,85	0,15	0,0047096	16,52
24,79	24,63	0,16	0,0064961	15,34
23,49	23,39	0,10	0,0042753	16,80
17,09	16,94	0,15	0,0088548	13,79
24,26	24,10	0,16	0,0066390	15,25
28,98	28,88	0,10	0,0034626	17,34
33,02	32,04	0,98	0,0305868	0,50
33,18	31,62	1,56	0,0493359	12,82
18,06	17,27	0,79	0,0457441	10,46
28,06	26,28	1,78	0,0677321	24,92
30,65	28,82	1,83	0,0634976	22,13
22,79	22,63	0,16	0,0070703	14,96
23,49	23,26	0,23	0,0098882	13,11
22,82	22,66	0,16	0,0070609	14,97
23,49	22,90	0,59	0,0257642	2,67
20,06	19,13	0,93	0,0486147	12,35
39,09	37,31	1,78	0,0477084	11,75
17,09	15,26	1,83	0,1199214	59,23
31,58	31,39	0,19	0,0060529	15,63
32,65	31,76	0,89	0,0280227	1,19
27,00	26,77	0,23	0,0085917	13,96
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				16,75

Таблица Д.18 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=45^\circ$, $A=3,5$ мм, $f=33,3$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
29,65	29,23	0,42	0,0143688	7,02
28,84	28,72	0,12	0,0041783	15,95
20,68	20,04	0,64	0,0319361	8,37
20,68	20,29	0,39	0,0192213	2,77
29,65	29,49	0,16	0,0054256	14,86
20,68	19,96	0,72	0,0360721	12,00
29,65	29,01	0,64	0,0220614	0,28
28,84	28,29	0,55	0,0194415	2,58
20,68	20,03	0,65	0,0324513	8,83
20,68	19,96	0,72	0,0360721	12,00
29,65	29,11	0,54	0,0185503	3,36
20,06	19,37	0,69	0,0356221	11,60
37,26	36,72	0,54	0,0147059	6,72
23,78	23,09	0,69	0,0298831	6,57
37,26	36,54	0,72	0,0197044	2,34
27,56	27,02	0,54	0,0199852	2,10
29,65	28,76	0,89	0,0309458	7,51
17,00	16,46	0,54	0,0328068	9,14
28,84	28,38	0,46	0,0162086	5,41
20,06	19,90	0,16	0,0080402	12,57
37,26	36,61	0,65	0,0177547	4,05
28,84	27,86	0,98	0,0351759	11,21
20,06	19,34	0,72	0,0372285	13,01
37,26	36,72	0,54	0,0147059	6,72
27,56	27,18	0,38	0,0139809	7,36
29,65	29,11	0,54	0,0185503	3,36
17,00	16,68	0,32	0,0191847	2,80
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				7,43

Таблица Д.19 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=30^\circ$, $A=2,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
26,77	26,24	0,53	0,0201982	5,37
19,59	19,43	0,16	0,0082347	9,43
22,82	22,29	0,53	0,0237775	9,80
22,16	21,27	0,89	0,0418430	32,14
33,16	33,07	0,09	0,0027215	16,25
33,16	31,58	1,58	0,0500317	42,27
38,89	38,80	0,09	0,0023196	16,74
19,59	19,50	0,09	0,0046154	13,90
22,82	22,29	0,53	0,0237775	9,80
32,35	32,19	0,16	0,0049705	13,46
36,49	35,96	0,53	0,0147386	1,38
32,35	31,46	0,89	0,0282899	15,38
22,82	21,29	1,53	0,0718647	69,28
33,16	32,38	0,78	0,0240889	10,18
22,16	22,01	0,15	0,0068151	11,18
31,56	31,40	0,16	0,0050955	13,31
33,58	33,05	0,53	0,0160363	0,22
33,16	32,41	0,75	0,0231410	9,01
26,78	26,69	0,09	0,0033720	15,44
32,35	32,19	0,16	0,0049705	13,46
36,49	36,31	0,18	0,0049573	13,48
32,35	31,60	0,75	0,0237342	9,75
26,78	26,69	0,09	0,0033720	15,44
36,49	36,33	0,16	0,0044041	14,16
32,35	32,26	0,09	0,0027898	16,16
22,16	22,07	0,09	0,0040779	14,57
36,49	36,35	0,14	0,0038514	14,85
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				15,79

Таблица Д.20 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=60^\circ$, $A=2,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
22,82	22,67	0,15	0,0066167	12,65
23,49	21,91	1,58	0,0721132	56,29
23,04	22,87	0,17	0,0074333	11,79
37,09	35,12	1,97	0,0560934	39,43
28,84	28,68	0,16	0,0055788	13,74
36,09	35,92	0,17	0,0047327	14,63
34,00	33,86	0,14	0,0041347	15,26
23,30	22,32	0,98	0,0439068	26,60
26,79	26,68	0,11	0,0041229	15,27
38,06	37,91	0,15	0,0039567	15,45
37,56	37,37	0,19	0,0050843	14,26
40,98	40,80	0,18	0,0044118	14,97
29,06	27,10	1,96	0,0723247	56,51
39,68	39,53	0,15	0,0037946	15,62
20,06	19,97	0,09	0,0045068	14,87
37,26	37,14	0,12	0,0032310	16,21
20,68	20,49	0,19	0,0092728	9,85
29,65	29,53	0,12	0,0040637	15,33
28,84	27,26	1,58	0,0579604	41,39
36,09	36,02	0,07	0,0019434	17,57
34,00	33,88	0,12	0,0035419	15,88
23,30	22,32	0,98	0,0439068	26,60
37,09	36,98	0,11	0,0029746	16,48
35,98	35,83	0,15	0,0041864	15,21
20,06	19,87	0,19	0,0095622	9,55
37,26	35,29	1,97	0,0558232	39,15
20,68	20,52	0,16	0,0077973	11,40
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				21,19

Таблица Д.21 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=45^\circ$, $A=2,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
33,16	32,63	0,53	0,0162427	1,08
38,89	38,00	0,89	0,0234211	7,11
19,59	19,50	0,09	0,0046154	14,35
22,82	21,33	1,49	0,0698547	60,07
33,16	33,00	0,16	0,0048485	14,08
38,89	37,31	1,58	0,0423479	28,70
19,59	19,50	0,09	0,0046154	14,35
22,82	22,69	0,13	0,0057294	13,08
22,16	21,63	0,53	0,0245030	8,34
26,49	25,60	0,89	0,0347656	20,05
33,16	33,07	0,09	0,0027215	16,51
38,89	38,33	0,56	0,0146100	2,95
19,59	19,10	0,49	0,0256545	9,65
22,82	22,41	0,41	0,0182954	1,26
22,16	22,00	0,16	0,0072727	11,32
31,56	31,40	0,16	0,0050955	13,80
33,58	33,05	0,53	0,0160363	1,32
33,16	32,27	0,89	0,0275798	11,85
26,78	26,69	0,09	0,0033720	15,76
32,35	32,19	0,16	0,0049705	13,94
36,49	36,33	0,16	0,0044041	14,59
32,35	31,86	0,49	0,0153798	2,07
26,78	26,62	0,16	0,0060105	12,76
32,35	30,82	1,53	0,0496431	37,02
36,49	35,60	0,89	0,0250000	8,91
32,35	32,26	0,09	0,0027898	16,43
36,49	36,33	0,16	0,0044041	14,59
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				14,24

Таблица Д.22 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=30^\circ$, $A=4,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
21,59	21,34	0,25	0,0117151	11,48
23,89	23,11	0,78	0,0337516	3,83
28,89	27,86	1,03	0,0369706	6,06
20,69	20,24	0,45	0,0222332	4,17
39,56	39,14	0,42	0,0107307	12,16
40,84	40,05	0,79	0,0197253	5,91
23,57	23,31	0,26	0,0111540	11,87
20,98	20,09	0,89	0,0443006	11,15
22,75	22,50	0,25	0,0111111	11,90
18,15	17,37	0,78	0,0449050	11,57
27,63	26,60	1,03	0,0387218	7,28
25,59	24,80	0,79	0,0318548	2,51
21,15	20,89	0,26	0,0124461	10,97
25,98	25,72	0,26	0,0101089	12,59
21,54	20,56	0,98	0,0476654	13,49
18,93	18,77	0,16	0,0085242	13,69
21,49	20,13	1,36	0,0675609	27,31
25,98	24,90	1,08	0,0433735	10,51
21,54	20,58	0,96	0,0466472	12,78
20,28	19,65	0,63	0,0320611	2,65
25,56	24,48	1,08	0,0441176	11,03
24,65	23,69	0,96	0,0405234	8,53
26,59	25,96	0,63	0,0242681	2,76
21,77	20,98	0,79	0,0376549	6,54
26,90	26,64	0,26	0,0097598	12,83
46,67	46,04	0,63	0,0136838	10,11
23,36	23,20	0,16	0,0068966	14,82
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				9,98

Таблица Д.23 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=60^\circ$, $A=4,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
32,35	31,82	0,53	0,0166562	0,69
36,49	36,33	0,16	0,0044041	14,61
32,35	31,82	0,53	0,0166562	0,69
22,82	21,93	0,89	0,0405837	26,50
33,16	33,07	0,09	0,0027215	16,52
38,89	37,31	1,58	0,0423479	28,50
31,56	31,47	0,09	0,0028599	16,36
33,58	33,49	0,09	0,0026874	16,56
33,16	33,00	0,16	0,0048485	14,10
26,49	26,33	0,16	0,0060767	12,71
33,16	32,67	0,49	0,0149985	2,57
38,89	38,73	0,16	0,0041312	14,92
19,59	18,06	1,53	0,0847176	76,65
22,82	22,04	0,78	0,0353902	20,60
22,16	21,98	0,18	0,0081893	10,31
31,56	31,40	0,16	0,0050955	13,82
33,58	33,05	0,53	0,0160363	1,39
33,16	32,41	0,75	0,0231410	6,68
26,78	26,69	0,09	0,0033720	15,78
32,35	32,19	0,16	0,0049705	13,96
36,49	36,33	0,16	0,0044041	14,61
32,35	31,86	0,49	0,0153798	2,14
26,78	26,62	0,16	0,0060105	12,78
19,59	18,06	1,53	0,0847176	76,65
22,82	22,73	0,09	0,0039595	15,11
22,16	22,00	0,16	0,0072727	11,35
36,49	36,33	0,16	0,0044041	14,61
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				17,42

Таблица Д.24 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=45^\circ$, $A=4,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
36,26	35,67	0,59	0,0165405	4,68
22,49	22,14	0,35	0,0158085	5,34
37,26	36,94	0,32	0,0086627	11,79
20,68	20,14	0,54	0,0268123	4,60
29,65	28,96	0,69	0,0238260	1,90
28,84	28,12	0,72	0,0256046	3,51
20,06	19,42	0,64	0,0329557	10,15
37,26	36,71	0,55	0,0149823	6,08
23,78	22,89	0,89	0,0388816	15,50
22,49	22,03	0,46	0,0208806	0,76
37,26	37,00	0,26	0,0070270	13,27
20,68	19,94	0,74	0,0371113	13,90
35,98	35,22	0,76	0,0215786	0,13
20,06	19,41	0,65	0,0334879	10,63
37,26	36,83	0,43	0,0116753	9,07
20,68	20,17	0,51	0,0252851	3,22
37,78	37,11	0,67	0,0180544	3,31
20,06	19,52	0,54	0,0276639	5,37
38,26	37,80	0,46	0,0121693	8,62
20,68	20,14	0,54	0,0268123	4,60
29,65	29,10	0,55	0,0189003	2,55
28,84	28,38	0,46	0,0162086	4,98
20,06	19,67	0,39	0,0198271	1,71
37,26	36,70	0,56	0,0152589	5,83
27,56	26,84	0,72	0,0268256	4,61
29,65	29,30	0,35	0,0119454	8,83
20,87	20,23	0,64	0,0316362	8,95
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				6,47

Таблица Д.25 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=30^\circ$, $A=3,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
23,27	21,29	1,98	0,0930014	25,27
24,99	23,21	1,78	0,0766911	17,40
30,15	28,40	1,75	0,0616197	10,13
20,59	19,95	0,64	0,0320802	4,13
37,98	37,56	0,42	0,0111821	14,21
32,79	31,55	1,24	0,0393027	0,64
25,64	25,02	0,62	0,0247802	7,65
20,45	18,67	1,78	0,0953401	26,40
20,87	19,22	1,65	0,0858481	21,82
18,13	16,56	1,57	0,0948068	26,14
26,87	25,34	1,53	0,0603788	9,53
24,91	24,02	0,89	0,0370525	1,73
19,86	18,69	1,17	0,0626003	10,60
22,59	22,47	0,12	0,0054747	16,97
21,38	20,21	1,17	0,0578921	8,33
20,92	19,76	1,16	0,0587045	8,72
21,12	20,23	0,89	0,0439941	1,62
35,09	34,88	0,21	0,0060206	16,71
21,53	21,38	0,15	0,0070159	16,23
20,89	19,91	0,98	0,0492215	4,14
25,49	25,03	0,46	0,0183779	10,74
24,41	24,19	0,22	0,0090947	15,22
20,83	20,60	0,23	0,0111650	14,22
21,98	21,72	0,26	0,0119700	13,83
13,79	13,54	0,25	0,0184638	10,70
36,86	36,21	0,65	0,0179508	10,95
24,02	23,85	0,17	0,0071279	16,17
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				12,68

Таблица Д.26 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=60^\circ$, $A=3,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
22,82	22,61	0,21	0,0092879	6,41
22,16	22,06	0,10	0,0045331	13,17
22,82	22,66	0,16	0,0070609	9,58
32,35	31,56	0,79	0,0250317	15,96
22,16	22,01	0,15	0,0068151	9,93
33,56	33,40	0,16	0,0047904	12,80
22,79	22,69	0,10	0,0044072	13,35
23,49	22,07	1,42	0,0643407	71,82
22,82	22,03	0,79	0,0358602	31,35
32,35	32,20	0,15	0,0046584	12,99
33,18	33,02	0,16	0,0048455	12,73
36,49	35,74	0,75	0,0209849	10,21
22,82	21,23	1,59	0,0748940	86,82
33,18	33,08	0,10	0,0030230	15,32
22,16	22,03	0,13	0,0059010	11,23
31,56	31,40	0,16	0,0050955	12,37
36,52	35,77	0,75	0,0209673	10,18
36,94	36,78	0,16	0,0043502	13,43
32,35	32,12	0,23	0,0071606	9,44
33,18	33,09	0,09	0,0027199	15,75
22,16	22,02	0,14	0,0063579	10,58
31,56	30,77	0,79	0,0256744	16,87
32,35	32,24	0,11	0,0034119	14,76
22,16	22,00	0,16	0,0072727	9,28
33,56	33,46	0,10	0,0029886	15,36
22,79	22,64	0,15	0,0066254	10,20
36,59	36,46	0,13	0,0035656	14,54
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				18,12

Таблица Д.27 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы базовой конструкции вибрационного СНД (смесь №1, $\beta=45^\circ$, $A=3,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г	Масса фонового компонента, г	Масса ключевого компонента, г	Концентрация, %	Коэффициент неоднородности V_c , %
21,46	20,8	0,66	0,0317308	4,32
23,89	23,58	0,31	0,0131467	9,70
28,89	28,20	0,69	0,0244681	1,16
20,59	20,14	0,45	0,0223436	2,76
37,56	37,14	0,42	0,0113086	11,08
40,84	39,86	0,98	0,0245861	1,07
24,54	24,18	0,36	0,0148883	8,38
20,68	20,36	0,32	0,0157171	7,76
20,75	20,50	0,25	0,0121951	10,42
18,14	17,36	0,78	0,0449309	14,27
27,59	26,56	1,03	0,0387801	9,63
25,59	24,80	0,79	0,0318548	4,41
19,83	19,57	0,26	0,0132856	9,59
22,7	22,07	0,63	0,0285455	1,91
20,47	20,28	0,19	0,0093688	12,55
18,93	17,95	0,98	0,0545961	21,56
21,15	19,79	1,36	0,0687216	32,21
25,98	24,90	1,08	0,0433735	13,10
21,54	20,58	0,96	0,0466472	15,56
20,26	19,63	0,63	0,0320937	4,59
25,56	25,42	0,14	0,0055075	15,46
24,65	24,19	0,46	0,0190161	5,27
26,59	25,94	0,65	0,0250578	0,72
21,77	20,94	0,83	0,0396371	10,28
26,96	26,60	0,36	0,0135338	9,41
46,67	46,21	0,46	0,0099546	12,11
23,29	23,13	0,16	0,0069174	14,40
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %				9,78

Приложение Е

Таблица Е.1 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,2$, $A=2,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
29,08	37,02	28,97	36,90	0,11	0,12	0,003797	0,003252	17,07	16,79
21,04	23,08	20,92	21,50	0,12	1,58	0,005736	0,073488	15,77	44,16
23,72	28,69	21,86	28,62	1,86	0,07	0,085087	0,002446	37,41	17,49
34,17	23,75	32,42	21,79	1,75	1,96	0,053979	0,089950	16,56	58,44
30,56	37,02	30,45	36,87	0,11	0,15	0,003612	0,004068	17,19	16,08
22,25	23,08	22,11	22,90	0,14	0,18	0,006332	0,007860	15,37	12,79
24,85	28,69	24,73	28,55	0,12	0,14	0,004852	0,004904	16,36	15,36
20,71	26,56	19,28	25,57	1,43	0,99	0,074170	0,038717	30,09	13,99
20,40	30,85	18,61	30,74	1,79	0,11	0,096185	0,003578	44,85	16,51
25,75	21,85	23,97	21,74	1,78	0,11	0,074259	0,005060	30,15	15,22
20,81	23,75	20,71	22,17	0,10	1,58	0,004829	0,071267	16,38	42,23
33,64	25,74	31,89	25,60	1,75	0,14	0,054876	0,005469	17,16	14,87
26,13	23,75	24,54	23,58	1,59	0,17	0,064792	0,007209	23,81	13,36
35,92	37,02	35,73	35,07	0,19	1,95	0,005318	0,055603	16,05	28,64
17,73	23,08	17,60	22,99	0,13	0,09	0,007386	0,003915	14,66	16,21
17,11	28,69	16,95	28,58	0,16	0,11	0,009440	0,003849	13,29	16,27
25,26	29,96	23,47	29,77	1,79	0,19	0,076268	0,006382	31,50	14,07
21,59	21,85	21,47	21,75	0,12	0,10	0,005589	0,004598	15,87	15,62
35,77	23,76	35,59	22,18	0,18	1,58	0,005058	0,071235	16,22	42,20
22,55	30,07	22,46	29,99	0,09	0,08	0,004007	0,002668	16,93	17,30
22,56	22,03	22,45	21,94	0,11	0,09	0,004900	0,004102	16,33	16,05
19,18	21,88	17,20	20,89	1,98	0,99	0,115116	0,047391	57,53	21,51
21,92	23,77	21,80	23,66	0,12	0,11	0,005505	0,004649	15,92	15,58
23,86	29,96	23,75	29,82	0,11	0,14	0,004632	0,004695	16,51	15,54
28,24	21,85	28,16	21,67	0,08	0,18	0,002841	0,008306	17,71	12,40
26,92	23,78	26,77	22,22	0,15	1,56	0,005603	0,070207	15,86	41,31
20,25	30,07	20,13	29,91	0,12	0,16	0,005961	0,005349	15,62	14,97
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c_{cp}}$, %								21,41	21,66

Таблица Е.2 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,04$, $A=2,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
33,90	40,90	33,81	40,81	0,09	0,09	0,002662	0,002205	18,23	18,55
24,50	37,50	24,31	37,31	0,19	0,19	0,007816	0,005092	15,55	17,15
25,62	22,62	25,47	22,47	0,15	0,15	0,005889	0,006676	16,55	16,39
18,79	25,79	15,82	22,82	2,97	2,97	0,187737	0,130149	77,86	43,29
33,87	43,87	33,74	43,75	0,13	0,12	0,003853	0,002743	17,61	18,29
19,90	37,90	19,71	37,72	0,19	0,18	0,009640	0,004772	14,61	17,31
25,55	22,55	25,44	22,44	0,11	0,11	0,004324	0,004902	17,37	17,24
22,57	18,57	20,66	16,11	1,91	2,46	0,092449	0,152700	28,39	54,19
27,74	24,74	27,63	24,63	0,11	0,11	0,003981	0,004466	17,54	17,45
29,74	26,74	29,58	26,58	0,16	0,16	0,005409	0,006020	16,80	16,70
19,17	16,17	18,98	15,98	0,19	0,19	0,010011	0,011890	14,41	13,87
25,60	40,69	25,46	40,55	0,14	0,14	0,005499	0,003453	16,76	17,94
20,58	18,58	18,09	15,94	2,49	2,64	0,137645	0,165621	51,85	60,43
32,07	29,07	31,92	28,93	0,15	0,14	0,004699	0,004839	17,17	17,27
19,99	36,99	19,90	36,90	0,09	0,09	0,004523	0,002439	17,26	18,43
29,58	36,58	29,47	36,47	0,11	0,11	0,003733	0,003016	17,67	18,15
26,77	43,77	26,60	43,68	0,17	0,09	0,006391	0,002060	16,29	18,62
35,75	41,75	35,66	41,66	0,09	0,09	0,002524	0,002160	18,30	18,57
19,18	20,18	16,60	16,93	2,58	3,25	0,155422	0,191967	61,08	73,16
26,99	37,99	26,92	37,92	0,07	0,07	0,002600	0,001846	18,26	18,72
34,94	39,94	34,82	39,82	0,12	0,12	0,003446	0,003014	17,82	18,16
17,89	40,89	17,78	40,78	0,11	0,11	0,006187	0,002697	16,40	18,31
20,66	36,66	20,54	36,57	0,12	0,09	0,005842	0,002461	16,58	18,42
26,82	18,82	23,88	15,89	2,94	2,93	0,123116	0,184393	44,31	69,50
37,67	43,67	37,49	43,54	0,18	0,13	0,004801	0,002986	17,12	18,17
17,22	19,22	14,17	16,17	3,05	3,05	0,215243	0,188621	92,14	71,55
26,91	40,91	26,79	40,81	0,12	0,1	0,004479	0,002450	17,29	18,43
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								26,34	27,59

Таблица Е.3 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,12$, $A=2,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
25,74	33,85	25,38	31,68	0,36	2,17	0,014184	0,068497	6,17	19,64
40,02	30,12	39,85	29,83	0,17	0,29	0,004266	0,009722	15,57	14,04
31,69	33,18	29,72	32,88	1,97	0,3	0,066285	0,009124	43,22	14,38
26,75	25,13	26,49	25,02	0,26	0,11	0,009815	0,004396	10,31	17,09
40,85	21,82	40,70	19,65	0,15	2,17	0,003686	0,110433	16,12	43,68
26,08	21,71	25,10	21,42	0,98	0,29	0,039044	0,013539	17,40	11,85
41,12	24,05	40,98	23,94	0,14	0,11	0,003416	0,004595	16,37	16,98
26,08	23,94	25,23	21,79	0,85	2,15	0,033690	0,098669	12,32	36,94
31,69	32,93	31,52	31,15	0,17	1,78	0,005393	0,057143	14,50	13,14
24,84	16,86	22,95	14,99	1,89	1,87	0,082353	0,124750	58,45	51,88
26,75	31,85	26,59	31,68	0,16	0,17	0,006017	0,005366	13,91	16,54
28,74	23,16	28,56	22,86	0,18	0,3	0,006303	0,013123	13,64	12,09
26,75	27,15	24,79	25,26	1,96	1,89	0,079064	0,074822	55,34	23,27
40,02	26,82	39,87	26,41	0,15	0,41	0,003762	0,015524	16,05	10,71
26,75	18,05	26,66	16,58	0,09	1,47	0,003376	0,088661	16,41	31,20
31,69	19,59	31,60	17,91	0,09	1,68	0,002848	0,093802	16,91	34,15
32,96	32,16	32,79	32,01	0,17	0,15	0,005185	0,004686	14,70	16,93
24,85	29,77	24,66	29,63	0,19	0,14	0,007705	0,004725	12,31	16,90
26,77	30,81	25,19	30,71	1,58	0,1	0,062723	0,003256	39,85	17,75
33,09	26,14	32,92	25,92	0,17	0,22	0,005164	0,008488	14,72	14,75
26,78	26,58	26,63	26,42	0,15	0,16	0,005633	0,006056	14,27	16,14
33,07	28,25	32,09	28,15	0,98	0,1	0,030539	0,003552	9,34	17,58
26,77	19,92	26,66	18,61	0,11	1,31	0,004126	0,070392	15,70	20,73
32,96	33,45	32,87	33,15	0,09	0,3	0,002738	0,009050	17,02	14,43
24,85	27,52	24,68	27,36	0,17	0,16	0,006888	0,005848	13,08	16,26
26,76	38,58	25,78	38,26	0,98	0,32	0,038014	0,008364	16,42	14,82
33,07	19,14	32,22	19,00	0,85	0,14	0,026381	0,007368	5,40	15,39
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								19,09	20,35

Таблица Е.4 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,2$, $A=4,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
30,04	34,05	29,87	32,59	0,17	1,46	0,005691	0,044799	15,94	8,06
29,36	30,17	29,23	29,99	0,13	0,18	0,004447	0,006002	16,74	15,90
18,97	33,08	17,41	31,85	1,56	1,23	0,089604	0,038619	38,18	4,24
26,69	24,15	25,33	22,87	1,36	1,28	0,053691	0,055969	15,02	14,96
29,91	23,82	29,55	23,37	0,36	0,45	0,012183	0,019255	11,75	7,72
35,04	19,71	34,71	18,05	0,33	1,66	0,009507	0,091967	13,48	37,19
35,68	24,05	35,43	22,51	0,25	1,54	0,007056	0,068414	15,06	22,64
32,46	22,95	30,49	21,58	1,97	1,37	0,064611	0,063485	22,06	19,60
20,21	31,95	18,90	30,41	1,31	1,54	0,069312	0,050641	25,09	11,67
27,47	26,86	26,23	26,63	1,24	0,23	0,047274	0,008637	10,88	14,28
33,65	31,85	31,87	31,49	1,78	0,36	0,055852	0,011432	16,41	12,55
36,38	22,56	35,17	22,43	1,21	0,13	0,034404	0,005796	2,58	16,03
26,72	27,15	25,01	25,52	1,71	1,63	0,068373	0,063871	24,49	19,84
27,44	26,82	27,23	26,58	0,21	0,24	0,007712	0,009029	14,64	14,03
27,21	18,05	25,76	16,63	1,45	1,42	0,056289	0,085388	16,69	33,13
23,89	19,59	22,68	19,43	1,21	0,16	0,053351	0,008235	14,80	14,53
29,37	32,16	28,92	31,93	0,45	0,23	0,015560	0,007203	9,58	15,16
33,35	29,77	33,03	29,41	0,32	0,36	0,009688	0,012241	13,36	12,05
22,72	30,80	22,55	30,71	0,17	0,09	0,007539	0,002931	14,75	17,80
17,71	26,14	16,82	25,99	0,89	0,15	0,052913	0,005771	14,51	16,05
29,93	36,58	29,54	36,43	0,39	0,15	0,013202	0,004117	11,10	17,07
29,79	28,25	29,58	27,99	0,21	0,26	0,007099	0,009289	15,03	13,87
25,45	19,97	25,03	19,70	0,42	0,27	0,016780	0,013706	8,79	11,15
18,77	33,45	18,30	32,49	0,47	0,96	0,025683	0,029548	3,05	1,36
27,36	27,52	27,11	26,19	0,25	1,33	0,009222	0,050783	13,66	11,75
37,14	19,64	36,47	18,10	0,67	1,54	0,018371	0,085083	7,76	32,94
26,96	25,46	26,81	25,33	0,15	0,13	0,005595	0,005132	16,00	16,44
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								14,87	16,00

Таблица Е.5 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,04$, $A=4,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
30,85	36,02	28,68	35,86	2,17	0,16	0,075662	0,004462	26,18	16,48
27,12	20,08	26,99	19,97	0,13	0,11	0,004817	0,005508	16,70	15,75
30,18	35,69	29,86	35,55	0,32	0,14	0,010717	0,003938	13,13	16,85
22,13	20,75	22,02	20,57	0,11	0,18	0,004995	0,008751	16,59	13,47
18,82	34,02	16,65	31,46	2,17	2,56	0,130330	0,081373	59,27	37,50
18,71	20,08	18,63	19,92	0,08	0,16	0,004294	0,008032	17,01	13,97
21,05	25,69	20,94	24,10	0,11	1,59	0,005253	0,065975	16,43	26,70
20,94	23,56	18,79	23,37	2,15	0,19	0,114423	0,008130	49,64	13,91
29,93	27,85	27,94	27,72	1,99	0,13	0,071224	0,004690	23,49	16,32
23,86	18,85	21,99	18,69	1,87	0,16	0,085039	0,008561	31,85	13,60
28,85	20,75	28,71	18,96	0,14	1,79	0,004876	0,094409	16,66	46,65
20,16	19,74	19,93	18,18	0,23	1,56	0,011540	0,085809	12,63	40,62
24,15	20,75	22,26	20,59	1,89	0,16	0,084906	0,007771	31,77	14,16
23,82	39,02	23,70	38,91	0,12	0,11	0,005063	0,002827	16,55	17,63
28,00	20,08	26,03	19,96	1,97	0,12	0,075682	0,006012	26,19	15,39
26,59	21,69	24,91	21,57	1,68	0,12	0,067443	0,005563	21,21	15,71
39,16	29,96	39,01	29,78	0,15	0,18	0,003845	0,006044	17,28	15,37
26,77	18,85	26,63	18,73	0,14	0,12	0,005257	0,006407	16,43	15,11
37,81	17,76	37,71	16,17	0,1	1,59	0,002652	0,098330	18,01	49,41
23,14	33,07	23,05	32,89	0,09	0,18	0,003905	0,005473	17,25	15,77
33,58	19,03	33,47	17,19	0,11	1,84	0,003287	0,107039	17,62	55,52
25,25	18,88	25,16	18,70	0,09	0,18	0,003577	0,009626	17,45	12,86
26,92	18,77	25,09	16,99	1,83	1,78	0,072937	0,104768	24,53	53,93
30,45	36,96	30,24	36,83	0,21	0,13	0,006944	0,003530	15,41	17,13
34,52	18,85	34,36	18,73	0,16	0,12	0,004657	0,006407	16,79	15,11
35,58	40,78	35,36	40,68	0,22	0,1	0,006222	0,002458	15,85	17,89
26,14	36,07	26,00	35,98	0,14	0,09	0,005385	0,002501	16,35	17,86
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								21,78	22,99

Таблица Е.6 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,12$, $A=4,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
28,48	26,64	28,09	26,18	0,39	0,46	0,013884	0,017571	13,20	6,83
22,44	23,16	20,79	23,04	1,65	0,12	0,079365	0,005208	17,06	15,82
25,19	27,43	24,55	26,18	0,64	1,25	0,026069	0,047746	7,57	15,12
26,24	29,62	24,86	28,30	1,38	1,32	0,055511	0,046643	6,04	14,32
35,87	21,68	35,22	21,26	0,65	0,42	0,018455	0,019755	11,08	5,24
27,96	23,56	27,61	23,30	0,35	0,26	0,012677	0,011159	13,75	11,49
21,98	37,43	20,34	37,19	1,64	0,24	0,080629	0,006453	17,65	14,92
20,61	23,94	18,86	23,37	1,75	0,57	0,092789	0,024390	23,27	1,87
20,31	29,26	18,68	27,96	1,63	1,3	0,087259	0,046495	20,71	14,21
28,38	20,83	27,49	19,59	0,89	1,24	0,032375	0,063298	4,65	26,44
22,33	22,94	21,77	21,76	0,56	1,18	0,025723	0,054228	7,73	19,84
16,43	25,59	15,11	24,30	1,32	1,29	0,087359	0,053086	20,76	19,01
27,93	19,89	26,37	18,26	1,56	1,63	0,059158	0,089266	7,72	45,33
21,79	36,87	21,20	36,66	0,59	0,21	0,027830	0,005728	6,75	15,44
29,81	23,66	29,23	22,45	0,58	1,21	0,019843	0,053898	10,44	19,60
24,02	28,68	22,37	27,48	1,65	1,2	0,073759	0,043668	14,47	12,16
25,79	22,89	24,12	22,57	1,67	0,32	0,069237	0,014178	12,38	9,30
33,46	38,07	33,05	37,71	0,41	0,36	0,012405	0,009547	13,88	12,67
25,38	21,75	23,53	21,51	1,85	0,24	0,078623	0,011158	16,72	11,49
36,14	28,54	35,57	28,00	0,57	0,54	0,016025	0,019286	12,21	5,58
28,38	23,63	27,79	23,21	0,59	0,42	0,021231	0,018096	9,80	6,45
21,93	29,14	21,51	28,87	0,42	0,27	0,019526	0,009352	10,59	12,81
26,91	23,62	25,13	23,22	1,78	0,4	0,070832	0,017227	13,12	7,08
26,53	29,78	25,92	29,35	0,61	0,43	0,023534	0,014651	8,74	8,95
33,65	21,68	33,33	21,45	0,32	0,23	0,009601	0,010723	15,18	11,81
24,65	23,81	24,24	23,64	0,41	0,17	0,016914	0,007191	11,80	14,38
35,84	23,15	35,30	22,97	0,54	0,18	0,015297	0,007836	12,54	13,91
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								12,60	13,79

Таблица Е.7 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,2$, $A=3,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
36,59	30,65	36,42	30,56	0,17	0,09	0,004668	0,002945	16,32	16,99
17,89	27,12	17,04	27,01	0,85	0,11	0,049883	0,004073	15,55	15,98
23,89	31,18	23,80	29,39	0,09	1,79	0,003782	0,060905	16,95	34,63
20,69	22,13	20,50	21,34	0,19	0,79	0,009268	0,037020	13,08	13,36
33,56	18,82	33,41	18,70	0,15	0,12	0,004490	0,006417	16,45	13,90
36,84	19,71	35,19	19,60	1,65	0,11	0,046888	0,005612	13,44	14,61
19,57	21,05	18,44	20,95	1,13	0,1	0,061280	0,004773	23,59	15,36
27,28	30,85	25,50	29,43	1,78	1,42	0,069804	0,048250	29,60	23,36
21,75	29,12	21,52	27,33	0,23	1,79	0,010688	0,065496	12,08	38,72
35,78	33,86	35,63	32,08	0,15	1,78	0,004210	0,055486	16,64	29,81
26,63	30,85	26,47	30,75	0,16	0,1	0,006045	0,003252	15,35	16,72
22,59	20,16	21,03	19,00	1,56	1,16	0,074180	0,061053	32,68	34,76
18,49	24,15	16,90	22,56	1,59	1,59	0,094083	0,070479	46,71	43,16
23,98	23,82	23,90	23,72	0,08	0,1	0,003347	0,004216	17,25	15,86
18,54	25,05	18,39	24,92	0,15	0,13	0,008157	0,005217	13,86	14,97
35,83	26,59	35,70	26,43	0,13	0,16	0,003641	0,006054	17,04	14,22
18,53	29,16	17,54	27,41	0,99	1,75	0,056442	0,063845	20,18	37,25
21,98	26,77	21,82	26,61	0,16	0,16	0,007333	0,006013	14,44	14,26
18,54	33,81	18,35	33,61	0,19	0,2	0,010354	0,005951	12,31	14,31
25,28	25,14	25,19	25,05	0,09	0,09	0,003573	0,003593	17,09	16,41
22,96	28,82	22,82	28,71	0,14	0,11	0,006135	0,003831	15,29	16,20
22,65	38,71	20,86	36,92	1,79	1,79	0,085810	0,048483	40,88	23,57
29,59	21,05	28,03	20,94	1,56	0,11	0,055655	0,005253	19,62	14,93
32,77	30,45	30,98	30,29	1,79	0,16	0,057779	0,005282	21,12	14,91
28,69	36,59	28,54	36,51	0,15	0,08	0,005256	0,002191	15,91	17,66
43,67	29,26	43,52	29,11	0,15	0,15	0,003447	0,005153	17,18	15,02
20,37	29,77	20,27	29,66	0,1	0,11	0,004933	0,003709	16,13	16,31
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								19,51	20,63

Таблица Е.8 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,04$, $A=3,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
27,04	27,87	26,90	27,78	0,14	0,09	0,005204	0,003240	15,27	17,28
26,36	36,12	26,15	35,93	0,21	0,19	0,008031	0,005288	12,91	15,80
25,97	20,18	25,82	20,03	0,15	0,15	0,005809	0,007489	14,76	14,22
23,69	19,13	21,72	17,16	1,97	1,95	0,090700	0,114802	56,13	63,05
26,91	34,02	26,76	33,87	0,15	0,15	0,005605	0,004429	14,93	16,42
32,04	20,08	31,85	19,89	0,19	0,20	0,005965	0,009553	14,63	12,73
32,68	25,69	32,54	25,58	0,14	0,11	0,004302	0,004300	16,02	16,52
29,46	20,75	27,55	18,84	1,91	1,92	0,069328	0,101380	38,28	53,38
17,21	34,02	17,10	33,91	0,11	0,12	0,006433	0,003244	14,24	17,28
24,47	20,08	24,31	19,92	0,16	0,16	0,006582	0,008032	14,12	13,83
30,65	25,85	30,46	25,66	0,19	0,20	0,006238	0,007405	14,40	14,28
33,38	17,16	33,20	16,98	0,18	0,18	0,005422	0,010601	15,08	11,98
23,72	18,88	21,76	16,39	1,96	2,49	0,090074	0,151922	55,60	89,77
24,44	20,77	24,29	20,62	0,15	0,14	0,006175	0,007274	14,45	14,37
20,21	26,96	20,12	26,87	0,09	0,10	0,004473	0,003349	15,88	17,20
20,89	24,85	20,78	24,74	0,11	0,11	0,005294	0,004446	15,19	16,41
26,37	20,78	26,18	20,59	0,19	0,21	0,007257	0,009228	13,55	12,97
36,35	37,07	36,24	36,96	0,11	0,11	0,003035	0,002976	17,08	17,47
19,72	36,81	18,14	34,23	1,58	2,58	0,087100	0,075372	53,12	34,66
24,71	20,14	24,64	20,07	0,07	0,08	0,002841	0,003488	17,24	17,10
26,93	35,58	26,81	35,46	0,12	0,12	0,004476	0,003384	15,87	17,18
18,79	22,29	18,61	22,11	0,18	0,17	0,009672	0,008141	11,53	13,75
22,45	18,92	22,33	18,80	0,12	0,11	0,005374	0,006383	15,12	15,02
15,77	39,45	14,18	36,86	1,59	2,58	0,112130	0,070266	74,02	30,98
24,36	36,52	24,18	36,34	0,18	0,17	0,007444	0,004953	13,40	16,05
34,14	32,58	32,17	29,61	1,97	2,97	0,061237	0,100304	31,52	52,61
22,96	43,14	22,78	42,96	0,18	0,19	0,007902	0,004190	13,01	16,59
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								22,87	24,04

Таблица Е.9 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,12$, $A=3,5$ мм, $f=16,67$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
27,04	24,04	26,89	23,91	0,15	0,13	0,005578	0,005437	14,32	16,87
26,36	23,36	26,23	21,73	0,13	1,63	0,004956	0,075012	14,91	18,18
35,97	32,97	34,34	32,71	1,63	0,26	0,047467	0,007949	25,43	15,61
23,69	20,69	23,52	20,60	0,17	0,09	0,007228	0,004369	12,75	17,41
26,91	23,91	26,02	23,76	0,89	0,15	0,034204	0,006313	12,84	16,43
32,04	29,04	31,65	28,70	0,39	0,34	0,012322	0,011847	7,92	13,64
32,68	29,68	32,47	29,56	0,21	0,12	0,006468	0,004060	13,47	17,57
29,46	26,46	28,00	24,21	1,46	2,25	0,052143	0,092937	29,86	27,21
27,21	24,21	27,03	22,59	0,18	1,62	0,006659	0,071713	13,29	16,52
24,47	21,47	23,24	20,05	1,23	1,42	0,052926	0,070823	30,61	16,07
30,65	27,65	30,42	27,44	0,23	0,21	0,007561	0,007653	12,44	15,76
33,38	30,38	33,02	28,63	0,36	1,75	0,010902	0,061125	9,27	11,18
23,72	20,72	23,59	19,09	0,13	1,63	0,005511	0,085385	14,38	23,41
24,44	21,44	22,81	21,28	1,63	0,16	0,071460	0,007519	48,19	15,82
24,21	21,21	23,85	19,56	0,36	1,65	0,015094	0,084356	5,29	22,89
20,89	17,89	20,80	16,25	0,09	1,64	0,004327	0,100923	15,51	31,24
26,37	23,37	26,22	21,88	0,15	1,49	0,005721	0,068099	14,18	14,70
30,35	27,35	28,68	25,57	1,67	1,78	0,058229	0,069613	35,64	15,46
19,72	16,72	19,57	16,56	0,15	0,16	0,007665	0,009662	12,34	14,74
34,71	31,71	32,75	31,48	1,96	0,23	0,059847	0,007306	37,17	15,93
26,93	23,93	26,78	23,77	0,15	0,16	0,005601	0,006731	14,30	16,22
26,79	23,79	26,70	23,70	0,09	0,09	0,003371	0,003797	16,41	17,70
22,45	19,45	22,36	18,14	0,09	1,31	0,004025	0,072216	15,79	16,77
25,77	22,77	25,53	20,88	0,24	1,89	0,009401	0,090517	10,69	25,99
24,36	21,36	24,02	21,21	0,34	0,15	0,014155	0,007072	6,18	16,05
34,14	31,14	33,16	30,82	0,98	0,32	0,029554	0,010383	8,43	14,38
23,96	20,96	23,59	20,79	0,37	0,17	0,015685	0,008177	4,73	15,49
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								16,91	17,75

Таблица Е.10 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,2$, $A=2,5$ мм, $f=33,33$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
23,64	37,01	22,18	36,89	1,46	0,12	0,065825	0,003253	22,35	17,38
30,16	33,17	29,98	32,96	0,18	0,21	0,006004	0,006371	15,78	15,23
24,43	36,08	23,20	34,54	1,23	1,54	0,053017	0,044586	14,19	11,04
26,62	27,13	25,34	27,02	1,28	0,11	0,050513	0,004071	12,59	16,81
28,68	26,82	28,53	26,37	0,15	0,45	0,005258	0,017065	16,26	7,88
20,56	22,71	20,30	22,43	0,26	0,28	0,012808	0,012483	11,45	11,03
34,43	27,05	34,16	26,78	0,27	0,27	0,007904	0,010082	14,57	12,68
20,94	25,95	19,98	23,98	0,96	1,97	0,048048	0,082152	11,02	36,86
26,26	34,95	24,93	33,41	1,33	1,54	0,053349	0,046094	14,40	12,07
31,83	19,86	30,01	18,20	1,82	1,66	0,060646	0,091209	19,05	43,08
19,94	34,80	18,85	33,26	1,09	1,54	0,057825	0,046302	17,25	12,22
22,59	25,56	21,22	24,19	1,37	1,37	0,064562	0,056635	21,54	19,32
25,89	30,15	24,26	28,52	1,63	1,63	0,067189	0,057153	23,22	19,67
33,87	29,82	33,66	29,61	0,21	0,21	0,006239	0,007092	15,63	14,74
20,66	21,05	19,45	19,84	1,21	1,21	0,062211	0,060988	20,05	22,31
25,68	22,59	24,48	21,39	1,2	1,2	0,049020	0,056101	11,64	18,95
19,89	35,16	19,66	34,93	0,23	0,23	0,011699	0,006585	12,15	15,09
34,07	32,77	33,71	32,41	0,36	0,36	0,010679	0,011108	12,80	11,98
18,75	33,81	18,62	33,68	0,13	0,13	0,006982	0,003860	15,16	16,96
24,54	29,14	24,42	28,99	0,12	0,15	0,004914	0,005174	16,48	16,05
20,63	39,58	20,44	39,34	0,19	0,24	0,009295	0,006101	13,69	15,42
26,14	21,25	24,60	19,83	1,54	1,42	0,062602	0,071609	20,30	29,61
20,62	22,92	20,51	22,76	0,11	0,16	0,005363	0,007030	16,19	14,78
26,79	36,45	26,36	35,86	0,43	0,59	0,016313	0,016453	9,21	8,30
18,68	30,52	18,41	29,78	0,27	0,74	0,014666	0,024849	10,26	2,53
20,81	22,64	20,53	22,36	0,28	0,28	0,013639	0,012522	10,92	11,00
22,17	26,46	22,08	26,37	0,09	0,09	0,004076	0,003413	17,01	17,27
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								15,39	16,68

Таблица Е.11 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,04$, $A=2,5$ мм, $f=33,33$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
40,02	39,59	39,87	39,45	0,15	0,14	0,003762	0,003549	16,27	16,58
26,08	24,89	24,50	23,60	1,58	1,29	0,064490	0,054661	37,73	27,08
31,69	20,89	31,53	20,73	0,16	0,16	0,005075	0,007718	15,10	13,02
26,75	17,69	25,18	16,68	1,57	1,01	0,062351	0,060552	35,83	32,11
40,02	37,56	39,86	37,41	0,16	0,15	0,004014	0,004010	16,04	16,19
26,08	39,84	25,82	39,65	0,26	0,19	0,010070	0,004792	10,66	15,52
31,69	22,57	31,55	22,43	0,14	0,14	0,004437	0,006242	15,67	14,28
29,56	24,28	28,58	22,37	0,98	1,91	0,034290	0,085382	10,88	53,33
33,85	18,75	33,68	18,64	0,17	0,11	0,005048	0,005901	15,12	14,57
24,85	32,78	22,88	32,62	1,97	0,16	0,086101	0,004905	56,94	15,42
26,75	35,63	26,59	35,44	0,16	0,19	0,006017	0,005361	14,26	15,03
28,74	19,59	28,56	19,41	0,18	0,18	0,006303	0,009274	14,01	11,69
26,75	17,49	24,79	15,86	1,96	1,63	0,079064	0,102774	50,69	68,18
40,02	20,98	39,87	20,83	0,15	0,15	0,003762	0,007201	16,27	13,46
26,08	19,54	25,99	19,45	0,09	0,09	0,003463	0,004627	16,53	15,66
31,69	37,83	31,57	37,72	0,12	0,11	0,003801	0,002916	16,23	17,12
32,96	32,53	32,79	32,35	0,17	0,18	0,005185	0,005564	15,00	14,86
24,85	38,98	24,73	38,90	0,12	0,08	0,004852	0,002057	15,30	17,85
26,76	17,54	25,18	16,00	1,58	1,54	0,062748	0,096250	36,18	62,61
33,07	22,28	33,00	22,21	0,07	0,07	0,002121	0,003152	17,73	16,92
25,03	40,96	24,91	40,84	0,12	0,12	0,004817	0,002938	15,33	17,10
24,88	19,65	23,90	19,47	0,98	0,18	0,041004	0,009245	16,85	11,71
26,77	39,59	26,66	39,47	0,11	0,12	0,004126	0,003040	15,94	17,01
32,96	27,77	32,80	25,99	0,16	1,78	0,004878	0,068488	15,27	38,89
24,85	25,69	24,66	25,54	0,19	0,15	0,007705	0,005873	12,76	14,59
26,78	40,67	25,00	38,70	1,78	1,97	0,071200	0,050904	43,69	23,87
33,07	36,37	32,91	36,28	0,16	0,09	0,004862	0,002481	15,29	17,49
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								21,39	22,67

Таблица Е.12 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,12$, $A=2,5$ мм, $f=33,33$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
28,56	26,88	28,14	26,73	0,42	0,15	0,014925	0,005612	13,21	15,82
23,54	26,23	21,76	26,11	1,78	0,12	0,081801	0,004596	15,49	16,50
25,19	34,41	24,60	32,76	0,59	1,65	0,023984	0,050366	9,32	14,45
26,24	22,33	24,75	21,09	1,49	1,24	0,060202	0,058796	6,22	20,14
20,61	26,55	20,19	26,20	0,42	0,35	0,020802	0,013359	10,68	10,58
20,31	31,71	19,01	31,50	1,30	0,21	0,068385	0,006667	9,73	15,10
28,38	32,43	26,41	32,19	1,97	0,24	0,074593	0,007456	12,40	14,57
20,62	27,49	18,73	26,37	1,89	1,12	0,100908	0,042473	23,69	9,11
22,45	35,59	20,82	34,28	1,63	1,31	0,078290	0,038215	13,98	6,23
33,54	23,23	32,65	21,99	0,89	1,24	0,027259	0,056389	7,91	18,52
22,33	28,87	21,28	27,09	1,05	1,78	0,049342	0,065707	1,56	24,82
25,43	32,17	24,87	30,96	0,56	1,21	0,022517	0,039083	9,95	6,82
27,93	22,01	25,37	20,30	2,56	1,71	0,100907	0,084236	23,69	37,35
21,79	24,23	21,20	24,02	0,59	0,21	0,027830	0,008743	7,67	13,70
29,81	22,76	29,23	21,31	0,58	1,45	0,019843	0,068043	11,10	26,40
24,02	19,68	22,37	18,47	1,65	1,21	0,073759	0,065512	12,04	24,69
25,79	25,92	24,12	25,50	1,67	0,42	0,069237	0,016471	10,10	8,47
35,46	30,03	35,05	29,71	0,41	0,32	0,011698	0,010771	14,59	12,33
25,38	19,55	23,53	19,37	1,85	0,18	0,078623	0,009293	14,13	13,33
36,14	23,82	35,57	22,93	0,57	0,89	0,016025	0,038814	12,74	6,63
28,33	26,54	27,74	26,15	0,59	0,39	0,021269	0,014914	10,48	9,53
21,92	26,58	20,46	26,37	1,46	0,21	0,071359	0,007964	11,01	14,23
26,99	22,03	25,24	21,61	1,75	0,42	0,069334	0,019435	10,14	6,47
26,53	35,35	26,00	34,88	0,53	0,47	0,020385	0,013475	10,86	10,50
24,85	24,11	24,57	23,87	0,28	0,24	0,011396	0,010054	14,72	12,81
24,65	33,47	24,56	32,79	0,09	0,68	0,003664	0,020738	18,04	5,59
29,94	23,81	29,48	23,67	0,46	0,14	0,015604	0,005915	12,92	15,61
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								12,16	14,46

Таблица Е.13 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,2$, $A=4,5$ мм, $f=33,33$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
29,65	31,67	29,30	31,48	0,35	0,19	0,011945	0,006036	8,39	13,32
17,00	25,79	16,82	25,4	0,18	0,39	0,010702	0,015354	9,56	3,62
28,84	28,80	28,20	28,19	0,64	0,65	0,022695	0,023058	1,71	4,41
29,49	29,51	29,08	29,24	0,41	0,27	0,014099	0,009234	6,37	9,99
39,30	39,32	39,14	38,87	0,16	0,45	0,004088	0,011577	15,77	7,55
31,65	31,68	30,93	30,96	0,72	0,72	0,023278	0,023256	2,26	4,61
25,78	25,77	24,99	24,98	0,79	0,79	0,031613	0,031625	10,09	13,33
24,16	24,17	23,60	23,61	0,56	0,56	0,023729	0,023719	2,68	5,09
23,98	23,96	23,33	23,31	0,65	0,65	0,027861	0,027885	6,56	9,43
18,89	31,65	18,62	31,38	0,27	0,27	0,014501	0,008604	5,99	10,65
19,03	25,78	18,58	25,33	0,45	0,45	0,024220	0,017765	3,14	1,11
19,59	19,59	18,90	19,43	0,69	0,16	0,036508	0,008235	14,69	11,03
20,98	31,65	20,44	30,93	0,54	0,72	0,026419	0,023278	5,21	4,64
29,06	25,58	28,35	24,79	0,71	0,79	0,025044	0,031868	3,92	13,58
33,36	33,37	32,64	32,81	0,72	0,56	0,022059	0,017068	1,11	1,83
27,56	27,56	27,02	27,02	0,54	0,54	0,019985	0,019985	0,84	1,21
29,65	29,68	28,76	28,79	0,89	0,89	0,030946	0,030914	9,46	12,59
17,00	17,00	16,46	16,46	0,54	0,54	0,032807	0,032807	11,21	14,56
28,84	28,84	28,38	28,38	0,46	0,46	0,016209	0,016209	4,38	2,73
39,30	39,3	39,14	39,14	0,16	0,16	0,004088	0,004088	15,77	15,35
31,65	31,65	31,30	31,30	0,35	0,35	0,011182	0,011182	9,11	7,96
25,78	25,79	24,89	24,90	0,89	0,89	0,035757	0,035743	13,98	17,62
20,06	20,06	19,34	19,90	0,72	0,16	0,037229	0,008040	15,36	11,24
37,26	29,69	36,72	29,53	0,54	0,16	0,014706	0,005418	5,80	13,97
27,56	17,00	27,17	16,65	0,39	0,35	0,014354	0,021021	6,13	2,28
29,65	28,54	29,20	27,65	0,45	0,89	0,015411	0,032188	5,13	13,92
19,06	19,07	18,83	18,84	0,23	0,23	0,012215	0,012208	8,14	6,90
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								7,53	8,68

Таблица Е.14 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,04$, $A=4,5$ мм, $f=33,33$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
23,89	28,68	23,75	26,70	0,14	1,98	0,005895	0,074157	16,60	24,48
23,23	26,83	21,58	26,52	1,65	0,31	0,076460	0,011689	19,47	12,66
31,34	29,88	31,10	29,52	0,24	0,36	0,007717	0,012195	15,67	12,36
20,52	22,02	20,42	21,90	0,10	0,12	0,004897	0,005479	17,11	16,35
23,02	16,65	22,87	14,48	0,15	2,17	0,006559	0,149862	16,26	69,50
28,65	18,42	28,31	18,11	0,34	0,31	0,012010	0,017118	13,47	9,43
29,47	20,94	29,36	20,83	0,11	0,11	0,003747	0,005281	17,70	16,47
25,59	18,79	23,44	16,64	2,15	2,15	0,091724	0,129207	27,27	57,22
24,03	28,15	22,42	26,36	1,61	1,79	0,071811	0,067906	17,09	20,77
20,24	31,99	18,85	30,12	1,39	1,87	0,073740	0,062085	18,08	17,31
27,42	28,68	27,20	28,51	0,22	0,17	0,008088	0,005963	15,48	16,07
30,02	19,86	28,26	19,56	1,76	0,30	0,062279	0,015337	12,22	10,49
20,59	22,26	18,96	20,54	1,63	1,72	0,085970	0,083739	24,33	30,18
19,81	23,41	19,65	23,00	0,16	0,41	0,008142	0,017826	15,45	9,01
20,85	23,58	19,21	22,13	1,64	1,45	0,085372	0,065522	24,02	19,35
22,49	34,95	20,90	33,74	1,59	1,21	0,076077	0,035862	19,27	1,71
23,22	29,01	21,74	28,87	1,48	0,14	0,068077	0,004849	15,18	16,73
25,68	26,63	23,90	26,51	1,78	0,12	0,074477	0,004527	18,46	16,92
36,57	27,71	36,42	27,52	0,15	0,19	0,004119	0,006904	17,51	15,51
29,75	22,92	29,52	22,70	0,23	0,22	0,007791	0,009692	15,63	13,85
23,78	23,42	23,64	23,26	0,14	0,16	0,005922	0,006879	16,58	15,52
23,79	25,15	23,69	25,05	0,10	0,10	0,004221	0,003992	17,45	17,24
19,36	22,61	18,05	21,30	1,31	1,31	0,072576	0,061502	17,48	16,96
22,53	30,15	20,64	29,85	1,89	0,30	0,091570	0,010050	27,19	13,64
21,02	24,36	20,86	24,17	0,16	0,19	0,007670	0,007861	15,69	14,94
30,16	35,26	29,84	34,93	0,32	0,33	0,010724	0,009447	14,13	13,99
20,59	28,89	20,42	28,73	0,17	0,16	0,008325	0,005569	15,36	16,30
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								17,8	19,06

Таблица Е.15 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,12$, $A=4,5$ мм, $f=33,33$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
33,62	26,46	33,03	25,92	0,59	0,54	0,017863	0,020833	7,35	5,31
32,75	29,60	32,00	28,96	0,75	0,64	0,023438	0,022099	3,52	4,44
22,58	21,48	21,90	21,17	0,68	0,31	0,031050	0,014643	1,71	9,56
20,56	22,23	19,69	21,45	0,87	0,78	0,044185	0,036364	10,72	5,36
33,54	35,77	32,90	34,64	0,64	1,13	0,019453	0,032621	6,26	2,79
39,06	22,71	38,04	21,97	1,02	0,74	0,026814	0,033682	1,20	3,52
39,54	27,41	38,68	27,05	0,86	0,36	0,022234	0,013309	4,35	10,47
36,52	25,58	35,46	24,55	1,06	1,03	0,029893	0,041955	0,91	9,20
23,85	36,80	23,21	35,96	0,64	0,84	0,027574	0,023359	0,68	3,57
31,05	19,35	30,47	19,01	0,58	0,34	0,019035	0,017885	6,54	7,33
37,00	34,80	36,65	34,24	0,35	0,56	0,009550	0,016355	13,06	8,38
20,02	25,16	19,38	24,31	0,64	0,85	0,033024	0,034965	3,06	4,40
30,57	30,15	29,72	29,41	0,85	0,74	0,028600	0,025162	0,02	2,33
30,98	29,82	30,44	29,28	0,54	0,54	0,017740	0,018443	7,43	6,95
32,06	21,06	30,21	20,02	1,85	1,04	0,061238	0,051948	22,43	16,06
28,54	36,80	26,89	35,24	1,65	1,56	0,061361	0,044268	22,52	10,79
33,22	28,70	32,37	27,50	0,85	1,2	0,026259	0,043636	1,58	10,35
37,65	21,64	36,35	21,28	1,3	0,36	0,035763	0,016917	4,94	7,99
26,35	22,66	25,72	21,77	0,63	0,89	0,024495	0,040882	2,80	8,46
21,25	29,72	20,71	29,18	0,54	0,54	0,026074	0,018506	1,71	6,90
33,61	20,71	32,93	20,24	0,68	0,47	0,020650	0,023221	5,43	3,67
33,24	21,00	32,79	20,55	0,45	0,45	0,013724	0,021898	10,19	4,57
29,81	22,78	28,40	21,93	1,41	0,85	0,049648	0,038760	14,47	7,00
22,06	36,49	21,70	35,85	0,36	0,64	0,016590	0,017852	8,22	7,35
31,05	29,69	30,30	28,95	0,75	0,74	0,024752	0,025561	2,62	2,06
40,83	21,16	40,14	20,40	0,69	0,76	0,017190	0,037255	7,81	5,97
20,82	21,18	19,96	20,39	0,86	0,79	0,043086	0,038744	9,97	6,99
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								6,39	6,72

Таблица Е.16 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,2$, $A=3,5$ мм, $f=33,33$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
26,78	26,31	26,55	26,13	0,23	0,18	0,008663	0,006889	4,76	14,84
33,09	29,77	32,51	29,62	0,58	0,15	0,017841	0,005064	10,98	16,10
26,34	35,63	26,15	34,22	0,19	1,41	0,007266	0,041204	7,15	8,92
31,87	29,19	31,53	27,83	0,34	1,36	0,010783	0,048868	1,12	14,23
32,95	29,12	32,79	28,77	0,16	0,35	0,004880	0,012165	11,25	11,19
32,11	28,16	31,96	27,83	0,15	0,33	0,004693	0,011858	11,56	11,40
13,52	19,18	12,94	18,92	0,58	0,26	0,044822	0,013742	57,24	10,10
33,52	29,45	32,73	27,48	0,79	1,97	0,024137	0,071689	21,77	30,03
21,54	19,73	21,40	18,42	0,14	1,31	0,006542	0,071118	8,40	29,64
23,58	20,79	23,42	19,55	0,16	1,24	0,006832	0,063427	7,90	24,31
40,24	28,13	40,11	26,80	0,13	1,33	0,003241	0,049627	14,05	14,76
38,09	35,63	37,91	34,42	0,18	1,21	0,004748	0,035154	11,47	4,73
22,06	35,49	21,76	33,78	0,3	1,71	0,013787	0,050622	4,03	15,44
23,45	29,01	23,33	28,80	0,12	0,21	0,005144	0,007292	10,79	14,56
32,52	24,74	32,39	23,29	0,13	1,45	0,004014	0,062258	12,73	23,50
28,68	25,91	28,52	24,70	0,16	1,21	0,005610	0,048988	9,99	14,31
33,50	17,69	32,75	17,24	0,75	0,45	0,022901	0,026102	19,65	1,54
26,85	28,76	26,69	28,44	0,16	0,32	0,005995	0,011252	9,33	11,82
26,34	21,43	26,11	21,26	0,23	0,17	0,008809	0,007996	4,51	14,07
31,87	27,73	31,78	26,84	0,09	0,89	0,002832	0,033159	14,76	3,35
31,52	30,24	31,38	29,85	0,14	0,39	0,004461	0,013065	11,96	10,56
25,88	27,91	25,32	27,70	0,56	0,21	0,022117	0,007581	18,31	14,36
26,77	28,06	26,25	27,61	0,52	0,45	0,019810	0,016298	14,35	8,32
33,54	34,64	33,35	34,19	0,19	0,45	0,005697	0,013162	9,84	10,50
24,85	26,29	24,59	26,04	0,26	0,25	0,010573	0,009601	1,48	12,96
27,76	34,63	27,13	33,93	0,63	0,7	0,023222	0,020631	20,20	5,32
26,79	25,89	26,54	25,74	0,25	0,15	0,009420	0,005828	3,46	15,58
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								12,33	13,57

Таблица Е.17 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,04$, $A=3,5$ мм, $f=33,33$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
36,85	19,46	34,98	17,64	1,87	1,82	0,053459	0,103175	13,74	33,03
33,12	20,89	32,95	20,77	0,17	0,12	0,005159	0,005778	16,39	16,66
36,18	25,89	35,88	24,13	0,3	1,76	0,008361	0,072938	14,40	17,60
28,13	27,59	28,02	25,84	0,11	1,75	0,003926	0,067724	17,16	14,94
24,82	34,56	22,65	34,35	2,17	0,21	0,095806	0,006114	40,16	16,49
24,71	37,84	24,42	37,52	0,29	0,32	0,011876	0,008529	12,20	15,26
27,05	21,54	26,94	19,79	0,11	1,75	0,004083	0,088428	17,06	25,51
26,94	17,68	24,79	17,59	2,15	0,09	0,086729	0,005117	34,50	17,00
35,93	17,75	34,15	17,59	1,78	0,16	0,052123	0,009096	12,91	14,97
19,86	35,14	19,71	35,00	0,15	0,14	0,007610	0,004000	14,86	17,57
34,85	24,59	34,62	22,72	0,23	1,87	0,006644	0,082306	15,47	22,38
26,16	22,59	24,80	22,50	1,36	0,09	0,054839	0,004000	14,60	17,57
30,15	16,83	28,26	16,69	1,89	0,14	0,066879	0,008388	22,11	15,33
29,82	19,77	29,39	19,61	0,43	0,16	0,014631	0,008159	10,48	15,45
21,05	37,47	19,58	34,69	1,47	2,78	0,075077	0,080138	27,23	21,28
22,59	25,93	20,91	25,79	1,68	0,14	0,080344	0,005428	30,51	16,84
35,16	18,15	35,04	18,07	0,12	0,08	0,003425	0,004427	17,48	17,35
32,77	22,98	30,92	22,82	1,85	0,16	0,059832	0,007011	17,72	16,03
33,81	18,54	32,03	16,89	1,78	1,65	0,055573	0,097691	15,06	30,23
29,14	17,26	28,99	17,17	0,15	0,09	0,005174	0,005242	16,38	16,94
29,58	22,56	29,44	22,40	0,14	0,16	0,004755	0,007143	16,64	15,97
31,25	21,65	31,15	21,50	0,1	0,15	0,003210	0,006977	17,61	16,05
22,92	23,59	21,61	21,61	1,31	1,98	0,060620	0,091624	18,21	27,14
36,45	18,77	36,15	17,31	0,3	1,46	0,008299	0,084344	14,43	23,42
30,52	23,96	30,36	22,17	0,16	1,79	0,005270	0,080740	16,32	21,58
41,58	43,67	41,26	43,54	0,32	0,13	0,007756	0,002986	14,77	18,09
22,14	20,29	21,98	18,61	0,16	1,68	0,007279	0,090274	15,07	26,45
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								18,28	19,51

Таблица Е.18 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,12$, $A=3,5$ мм, $f=33,33$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
29,56	25,80	28,88	24,54	0,68	1,26	0,023546	0,051345	4,51	13,84
33,85	25,60	33,33	25,33	0,52	0,27	0,015602	0,010659	3,63	12,67
24,85	33,37	24,14	32,73	0,71	0,64	0,029412	0,019554	10,52	6,87
26,75	29,51	26,33	29,16	0,42	0,35	0,015951	0,012003	3,27	11,79
40,02	20,06	39,60	19,42	0,42	0,64	0,010606	0,032956	8,75	1,86
26,08	29,54	25,35	29,28	0,73	0,26	0,028797	0,008880	9,89	13,83
31,69	22,65	31,30	21,49	0,39	1,16	0,012460	0,053979	6,85	15,56
29,56	20,78	29,19	20,09	0,37	0,69	0,012676	0,034345	6,63	2,77
33,85	38,45	33,62	37,92	0,23	0,53	0,006841	0,013977	12,60	10,50
24,85	19,98	24,03	19,61	0,82	0,37	0,034124	0,018868	15,34	7,32
38,06	23,19	37,09	21,98	0,97	1,21	0,026153	0,055050	7,18	16,26
28,74	18,03	27,78	17,14	0,96	0,89	0,034557	0,051925	15,79	14,22
26,75	26,35	26,55	25,86	0,2	0,49	0,007533	0,018948	11,90	7,26
40,02	25,96	39,79	25,60	0,23	0,36	0,005780	0,014063	13,69	10,45
26,08	31,59	25,89	30,21	0,19	1,38	0,007339	0,045680	12,09	10,15
31,69	25,77	30,71	25,09	0,98	0,68	0,031911	0,027102	13,08	1,95
32,96	24,82	32,30	23,48	0,66	1,34	0,020433	0,057070	1,32	17,58
24,85	29,51	24,16	28,84	0,69	0,67	0,028560	0,023232	9,64	4,47
26,78	20,06	26,13	19,44	0,65	0,62	0,024876	0,031893	5,87	1,17
33,07	29,54	32,71	28,78	0,36	0,76	0,011006	0,026407	8,34	2,40
25,03	27,84	24,57	27,48	0,46	0,36	0,018722	0,013100	0,43	11,08
24,85	29,87	24,65	28,33	0,2	1,54	0,008114	0,054359	11,30	15,81
26,76	40,12	26,11	39,56	0,65	0,56	0,024895	0,014156	5,89	10,39
40,87	27,43	40,04	26,11	0,83	1,32	0,020729	0,050555	1,62	13,33
33,89	36,63	33,53	35,43	0,36	1,20	0,010737	0,033870	8,61	2,46
33,85	37,30	33,20	36,48	0,65	0,82	0,019578	0,022478	0,44	4,96
24,85	25,13	24,22	24,73	0,63	0,40	0,026012	0,016175	7,03	9,07
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								8,01	9,26

Таблица Е.19 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,2$, $A=2,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
37,04	30,03	36,83	28,14	0,21	1,89	0,005702	0,067164	11,36	20,12
26,77	29,00	26,59	28,84	0,18	0,16	0,006769	0,005548	9,82	16,33
31,69	28,90	31,55	28,58	0,14	0,32	0,004437	0,011197	13,19	12,99
28,06	36,69	27,27	36,58	0,79	0,11	0,028970	0,003007	22,29	17,83
32,95	29,90	32,80	27,75	0,15	2,15	0,004573	0,077477	13,00	26,22
26,11	35,04	25,95	34,70	0,16	0,34	0,006166	0,009798	10,69	13,81
40,59	35,68	40,44	35,57	0,15	0,11	0,003709	0,003092	14,25	17,78
28,06	32,46	26,64	30,31	1,42	2,15	0,053303	0,070934	57,49	22,35
32,95	20,21	32,16	18,43	0,79	1,78	0,024565	0,096582	15,92	37,53
31,69	27,47	31,52	27,32	0,17	0,15	0,005393	0,005490	11,81	16,36
32,96	33,65	32,80	33,42	0,16	0,23	0,004878	0,006882	12,56	15,54
24,85	16,38	24,10	15,02	0,75	1,36	0,031120	0,090546	25,40	33,96
24,85	26,72	23,39	24,83	1,46	1,89	0,062420	0,076118	70,68	25,42
40,02	27,44	39,90	26,90	0,12	0,54	0,003008	0,020074	15,26	7,74
26,75	27,21	26,62	26,74	0,13	0,47	0,004884	0,017577	12,55	9,21
31,69	23,89	31,53	22,21	0,16	1,68	0,005075	0,075642	12,27	25,14
26,78	29,37	26,03	29,25	0,75	0,12	0,028813	0,004103	22,07	17,18
33,09	33,35	32,93	31,50	0,16	1,85	0,004859	0,058730	12,58	15,13
26,34	22,72	26,11	20,94	0,23	1,78	0,008809	0,085005	6,87	30,68
31,87	17,71	31,78	17,56	0,09	0,15	0,002832	0,008542	15,52	14,56
25,49	29,93	25,35	29,79	0,14	0,14	0,005523	0,004700	11,62	16,83
30,03	29,79	29,24	29,69	0,79	0,1	0,027018	0,003368	19,47	17,62
26,77	25,40	26,63	24,09	0,14	1,31	0,005257	0,054379	12,01	12,56
32,95	18,70	32,79	18,38	0,16	0,32	0,004880	0,017410	12,55	9,31
24,85	27,30	24,72	27,13	0,13	0,17	0,005259	0,006266	12,00	15,90
27,76	37,14	27,58	36,82	0,18	0,32	0,006526	0,008691	10,17	14,47
26,78	26,96	26,48	26,78	0,3	0,18	0,011329	0,006721	3,22	15,64
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								17,27	18,45

Таблица Е.20 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,04$, $A=2,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
23,77	27,85	23,61	27,71	0,16	0,14	0,006777	0,005052	13,90	16,16
36,59	36,12	35,01	35,93	1,58	0,19	0,045130	0,005288	18,42	16,00
19,82	27,18	19,66	27,05	0,16	0,13	0,008138	0,004806	12,75	16,33
19,16	19,13	17,20	18,95	1,96	0,18	0,113953	0,009499	76,41	13,13
30,16	23,82	30,01	21,26	0,15	2,56	0,004998	0,120414	15,40	62,59
30,16	25,71	29,98	25,55	0,18	0,16	0,006004	0,006262	14,55	15,34
35,89	18,05	35,75	16,46	0,14	1,59	0,003916	0,096598	16,31	46,33
26,59	17,94	25,62	17,75	0,97	0,19	0,037861	0,010704	12,29	12,30
19,82	26,93	19,71	26,80	0,11	0,13	0,005581	0,004851	14,91	16,30
29,35	26,86	29,21	26,70	0,14	0,16	0,004793	0,005993	15,57	15,52
33,49	25,85	33,30	24,06	0,19	1,79	0,005706	0,074397	14,80	31,18
29,35	17,16	29,17	15,60	0,18	1,56	0,006171	0,100000	14,41	48,65
19,82	21,15	17,86	20,99	1,96	0,16	0,109742	0,007623	72,86	14,41
30,16	36,82	30,01	36,60	0,15	0,22	0,004998	0,006011	15,40	15,51
19,16	25,56	19,07	25,44	0,09	0,12	0,004719	0,004717	15,63	16,39
28,56	37,59	28,45	37,46	0,11	0,13	0,003866	0,003470	16,35	17,24
30,58	36,16	30,39	35,98	0,19	0,18	0,006252	0,005003	14,34	16,20
30,16	33,77	30,04	33,65	0,12	0,12	0,003995	0,003566	16,25	17,18
23,78	36,81	22,20	36,72	1,58	0,09	0,071171	0,002451	40,36	17,94
29,35	20,14	29,27	18,55	0,08	1,59	0,002733	0,085714	17,31	38,90
33,49	35,58	33,37	35,40	0,12	0,18	0,003596	0,005085	16,58	16,14
29,35	22,25	28,37	20,41	0,98	1,84	0,034544	0,090152	9,50	41,93
23,78	18,92	23,67	17,14	0,11	1,78	0,004647	0,103851	15,70	51,28
33,49	27,45	33,34	27,32	0,15	0,13	0,004499	0,004758	15,82	16,36
29,35	31,52	29,16	31,40	0,19	0,12	0,006516	0,003822	14,12	17,00
19,16	32,58	17,21	32,48	1,95	0,1	0,113306	0,003079	75,86	17,51
33,49	36,14	33,33	36,05	0,16	0,09	0,004800	0,002497	15,57	17,91
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								22,64	23,78

Таблица Е.21 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,12$, $A=2,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
26,14	40,02	25,88	39,64	0,26	0,38	0,010046	0,009586	12,88	11,07
28,76	26,75	28,63	26,10	0,13	0,65	0,004541	0,024904	16,57	2,57
21,64	31,69	19,99	30,43	1,65	1,26	0,082541	0,041407	35,66	17,26
21,75	32,96	20,43	32,60	1,32	0,36	0,064611	0,011043	23,65	9,78
27,19	24,85	26,74	24,68	0,45	0,17	0,016829	0,006888	8,34	13,48
26,01	26,11	25,79	24,56	0,22	1,55	0,008530	0,063111	13,90	36,59
23,41	40,59	23,17	40,43	0,24	0,16	0,010358	0,003957	12,68	16,09
35,73	28,06	35,17	26,94	0,56	1,12	0,015923	0,041574	8,95	17,41
27,82	32,95	26,51	32,20	1,31	0,75	0,049415	0,023292	13,48	1,13
29,65	24,84	28,40	23,83	1,25	1,01	0,044014	0,042384	9,86	18,13
18,28	26,75	17,07	25,90	1,21	0,85	0,070885	0,032819	27,85	9,62
21,87	28,77	20,81	28,59	1,06	0,18	0,050937	0,006296	14,50	14,00
22,37	24,85	20,76	22,89	1,61	1,96	0,077553	0,085627	32,32	56,65
18,26	40,02	18,05	39,87	0,21	0,15	0,011634	0,003762	11,82	16,26
26,23	26,75	24,78	26,66	1,45	0,09	0,058515	0,003376	19,57	16,61
19,37	31,69	18,17	31,60	1,2	0,09	0,066043	0,002848	24,61	17,08
21,12	26,06	20,80	25,89	0,32	0,17	0,015385	0,006566	9,31	13,76
32,05	41,26	31,69	41,07	0,36	0,19	0,011360	0,004626	12,00	15,49
20,53	26,34	20,33	24,75	0,2	1,59	0,009838	0,064242	13,02	37,60
32,57	31,69	32,03	31,54	0,54	0,15	0,016859	0,004756	8,32	15,38
24,74	26,78	24,35	26,63	0,39	0,15	0,016016	0,005633	8,89	14,60
17,46	33,09	17,20	32,14	0,26	0,95	0,015116	0,029558	9,49	6,71
22,24	26,77	21,82	26,62	0,42	0,15	0,019248	0,005635	6,72	14,59
23,56	32,85	23,13	32,70	0,43	0,15	0,018591	0,004587	7,16	15,53
21,58	24,85	21,35	24,68	0,23	0,17	0,010773	0,006888	12,40	13,48
21,56	27,74	21,40	26,81	0,16	0,93	0,007477	0,034689	14,61	11,28
23,47	26,75	23,29	26,11	0,18	0,64	0,007729	0,024512	14,44	2,22
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								14,93	16,09

Таблица Е.22 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,2$, $A=4,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
24,65	33,24	24,16	33,06	0,49	0,18	0,020281	0,005445	6,32	15,52
20,56	33,07	20,14	32,22	0,42	0,85	0,020854	0,026381	5,95	0,20
39,09	25,01	38,20	24,54	0,89	0,47	0,023298	0,019152	4,35	5,23
19,59	24,36	19,44	23,51	0,15	0,85	0,007716	0,036155	14,56	7,54
39,32	27,56	37,67	27,35	1,65	0,21	0,043801	0,007678	9,09	13,85
31,68	26,08	30,43	25,72	1,25	0,36	0,041078	0,013997	7,30	9,10
25,97	31,65	25,33	31,14	0,64	0,51	0,025266	0,016378	3,06	7,31
24,17	29,05	23,65	28,16	0,52	0,89	0,021987	0,031605	5,21	4,12
23,96	40,09	23,81	39,63	0,15	0,46	0,006300	0,011607	15,48	10,89
31,65	23,85	30,78	21,91	0,87	1,94	0,028265	0,088544	1,09	46,88
24,17	38,06	22,91	36,80	1,26	1,26	0,054998	0,034239	16,42	6,10
19,59	28,70	19,32	28,24	0,27	0,46	0,013975	0,016289	10,46	7,38
25,78	23,34	25,29	23,15	0,49	0,19	0,019375	0,008207	6,92	13,45
25,58	25,90	24,71	25,67	0,87	0,23	0,035208	0,008960	3,46	12,88
33,37	21,20	31,78	20,35	1,59	0,85	0,050031	0,041769	13,17	11,76
27,56	40,21	27,06	39,75	0,50	0,46	0,018477	0,011572	7,51	10,92
29,68	36,60	29,52	34,96	0,16	1,64	0,005420	0,046911	16,06	15,62
17,60	39,30	16,02	39,17	1,58	0,13	0,098627	0,003319	45,01	17,12
31,67	38,06	31,09	37,21	0,58	0,85	0,018656	0,022843	7,39	2,46
25,79	32,46	24,89	31,26	0,90	1,20	0,036159	0,038388	4,08	9,22
28,84	33,85	28,63	32,02	0,21	1,83	0,007335	0,057152	14,81	23,31
29,51	24,85	28,23	24,55	1,28	0,30	0,045342	0,012220	10,10	10,43
20,06	26,74	19,41	25,89	0,65	0,85	0,033488	0,032831	2,33	5,04
29,54	40,02	27,97	39,56	1,57	0,46	0,056132	0,011628	17,17	10,88
31,59	35,85	30,29	34,65	1,30	1,20	0,042918	0,034632	8,51	6,40
25,77	37,13	25,13	35,30	0,64	1,83	0,025468	0,051841	2,93	19,32
24,82	39,00	24,63	38,41	0,19	0,59	0,007714	0,015361	14,56	8,08
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								10,19	11,51

Таблица Е.23 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,04$, $A=4,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
35,26	30,85	35,05	30,07	0,21	0,78	0,005991	0,025939	16,48	6,13
28,89	27,12	28,65	27,02	0,24	0,1	0,008377	0,003701	15,23	15,94
29,88	30,18	28,10	29,02	1,78	1,16	0,063345	0,039972	13,50	20,06
22,02	22,13	20,71	21,34	1,31	0,79	0,063254	0,037020	13,46	17,13
16,65	18,82	15,41	18,67	1,24	0,15	0,080467	0,008034	22,45	11,64
18,42	18,71	16,64	18,60	1,78	0,11	0,106971	0,005914	36,31	13,74
20,94	21,05	19,73	20,95	1,21	0,1	0,061328	0,004773	12,45	14,87
18,79	20,94	16,64	19,52	2,15	1,42	0,129207	0,072746	47,93	52,59
28,15	29,93	26,40	28,14	1,75	1,79	0,066288	0,063611	15,04	43,52
31,99	33,86	31,64	33,71	0,35	0,15	0,011062	0,004450	13,83	15,20
28,68	28,85	28,40	28,69	0,28	0,16	0,009859	0,005577	14,46	14,08
19,86	20,16	19,72	19,41	0,14	0,75	0,007099	0,038640	15,90	18,74
22,26	24,15	20,54	22,56	1,72	1,59	0,083739	0,070479	24,16	50,34
23,41	23,82	23,10	23,72	0,31	0,1	0,013420	0,004216	12,60	15,43
23,88	25,05	23,66	24,92	0,22	0,13	0,009298	0,005217	14,75	14,43
23,23	36,59	23,07	36,43	0,16	0,16	0,006935	0,004392	15,99	15,25
31,41	29,16	31,33	27,41	0,08	1,75	0,002553	0,063845	18,28	43,76
19,33	26,77	17,59	26,61	1,74	0,16	0,098920	0,006013	32,10	13,64
23,55	27,81	23,39	27,61	0,16	0,2	0,006841	0,007244	16,04	12,42
28,71	23,14	28,56	23,05	0,15	0,09	0,005252	0,003905	16,87	15,74
28,68	23,58	28,56	23,47	0,12	0,11	0,004202	0,004687	17,42	14,96
26,83	25,25	25,18	24,46	1,65	0,79	0,065528	0,032298	14,64	12,44
29,88	24,92	27,92	24,81	1,96	0,11	0,070201	0,004434	17,09	15,21
30,15	30,45	29,85	30,29	0,3	0,16	0,010050	0,005282	14,36	14,37
24,36	24,52	24,14	24,44	0,22	0,08	0,009114	0,003273	14,85	16,36
35,26	35,58	34,93	35,43	0,33	0,15	0,009447	0,004234	14,67	15,41
28,89	36,14	28,77	36,01	0,12	0,13	0,004171	0,003610	17,43	16,03
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								18,46	19,61

Таблица Е.24 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,12$, $A=4,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
33,61	20,56	31,76	19,31	1,85	1,25	0,058249	0,064733	18,49	23,73
31,75	33,45	30,92	32,77	0,83	0,68	0,026843	0,020751	2,05	5,72
32,52	19,63	31,46	18,60	1,06	1,03	0,033694	0,055376	2,43	17,47
17,86	32,65	17,00	32,19	0,86	0,46	0,050588	0,014290	13,48	10,04
29,87	32,95	29,04	32,10	0,83	0,85	0,028581	0,026480	0,92	1,88
38,35	31,26	37,10	31,10	1,25	0,16	0,033693	0,005145	2,43	16,17
17,56	22,63	16,88	22,18	0,68	0,45	0,040284	0,020289	6,74	6,03
32,68	32,68	31,65	32,00	1,03	0,68	0,032543	0,021250	1,68	5,38
23,45	23,45	22,99	22,73	0,46	0,72	0,020009	0,031676	6,52	1,60
24,85	24,85	24,00	23,79	0,85	1,06	0,035417	0,044557	3,55	10,22
31,65	31,65	31,12	31,13	0,53	0,52	0,017031	0,016704	8,47	8,43
39,09	39,09	38,63	38,63	0,46	0,46	0,011908	0,011908	11,82	11,64
30,56	39,34	29,98	38,49	0,58	0,85	0,019346	0,022084	6,96	4,83
21,54	32,64	20,91	32,01	0,63	0,63	0,030129	0,019681	0,10	6,43
33,06	29,02	31,78	27,74	1,28	1,28	0,040277	0,046143	6,73	11,28
30,58	30,56	28,93	28,91	1,65	1,65	0,057034	0,057074	17,69	18,60
32,25	21,54	31,40	20,69	0,85	0,85	0,027070	0,041083	1,91	7,89
31,65	33,06	30,35	31,76	1,3	1,3	0,042834	0,040932	8,41	7,79
26,35	25,06	25,72	24,43	0,63	0,63	0,024495	0,025788	3,59	2,35
21,25	21,25	20,73	20,73	0,52	0,52	0,025084	0,025084	3,20	2,82
33,62	33,61	33,25	33,24	0,37	0,37	0,011128	0,011131	12,33	12,16
32,75	31,75	32,21	30,90	0,54	0,85	0,016765	0,027508	8,65	1,19
39,06	32,52	37,58	31,06	1,48	1,46	0,039383	0,047006	6,15	11,86
22,06	17,86	21,80	17,60	0,26	0,26	0,011927	0,014773	11,81	9,72
31,05	29,87	30,46	29,29	0,59	0,58	0,019370	0,019802	6,94	6,35
37,00	38,35	36,25	37,60	0,75	0,75	0,020690	0,019947	6,08	6,26
20,02	17,56	19,34	16,89	0,68	0,67	0,035160	0,039668	3,39	6,95
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								6,76	8,69

Таблица Е.25 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,2$, $A=3,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
25,21	19,68	24,70	19,47	0,51	0,21	0,020648	0,010786	7,19	13,84
26,34	26,65	25,45	26,48	0,89	0,17	0,034971	0,006420	1,43	16,18
32,02	25,84	31,56	24,39	0,46	1,45	0,014575	0,059451	10,84	12,21
39,09	17,68	38,73	16,32	0,36	1,36	0,009295	0,083333	14,02	24,99
27,56	26,65	26,81	26,22	0,75	0,43	0,027975	0,016400	2,78	10,83
26,08	27,68	24,12	27,26	1,96	0,42	0,081260	0,015407	29,28	11,37
31,60	26,65	30,34	26,39	1,26	0,26	0,041529	0,009852	5,38	14,34
31,85	25,84	31,28	23,87	0,57	1,97	0,018223	0,082530	8,65	24,56
42,06	17,68	41,71	16,36	0,35	1,32	0,008391	0,080685	14,56	23,57
18,98	17,68	17,04	16,44	1,94	1,24	0,113850	0,075426	48,89	20,76
19,34	26,65	18,08	25,32	1,26	1,33	0,069690	0,052528	22,32	8,50
23,09	17,06	22,63	15,85	0,46	1,21	0,020327	0,076341	7,38	21,25
20,64	34,26	20,45	32,55	0,19	1,71	0,009291	0,052535	14,02	8,51
22,46	20,78	22,23	20,57	0,23	0,21	0,010346	0,010209	13,39	14,15
33,24	34,26	33,06	32,28	0,18	1,98	0,005445	0,061338	16,34	13,22
33,07	17,68	32,22	16,47	0,85	1,21	0,026381	0,073467	3,74	19,71
25,01	34,78	23,37	34,33	1,64	0,45	0,070175	0,013108	22,61	12,60
24,36	17,06	24,23	16,74	0,13	0,32	0,005365	0,019116	16,38	9,38
19,00	25,84	18,15	25,67	0,85	0,17	0,046832	0,006623	8,57	16,07
40,52	17,06	40,36	16,17	0,16	0,89	0,003964	0,055040	17,23	9,85
38,36	34,26	36,94	33,87	1,42	0,39	0,038441	0,011515	3,52	13,45
28,50	25,84	28,25	25,63	0,25	0,21	0,008850	0,008194	14,29	15,23
31,69	17,06	30,84	16,21	0,85	0,85	0,027562	0,052437	3,03	8,45
22,37	34,26	21,91	33,81	0,46	0,45	0,020995	0,013310	6,98	12,49
31,85	24,56	30,65	24,31	1,20	0,25	0,039152	0,010284	3,95	14,11
23,06	26,65	21,23	25,91	1,83	0,74	0,086199	0,028560	32,25	4,32
27,13	34,21	26,59	34,06	0,54	0,15	0,020308	0,004404	7,39	17,25
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								13,20	14,49

Таблица Е.26 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,04$, $A=3,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
32,26	27,65	32,08	27,53	0,18	0,12	0,005611	0,004359	16,72	15,94
25,89	24,12	24,04	24,03	1,85	0,09	0,076955	0,003745	20,06	16,46
26,88	28,18	26,72	26,41	0,16	1,77	0,005988	0,067020	16,52	36,84
19,02	19,13	17,17	18,38	1,85	0,75	0,107746	0,040805	35,94	14,76
33,65	35,82	33,56	35,71	0,09	0,11	0,002682	0,003080	18,23	17,02
25,42	26,75	25,25	26,59	0,17	0,16	0,006733	0,006017	16,14	14,54
17,94	19,69	17,85	19,60	0,09	0,09	0,005042	0,004592	17,01	15,74
23,79	27,85	23,71	26,42	0,08	1,43	0,003374	0,054126	17,87	25,98
25,15	26,12	23,40	24,33	1,75	1,79	0,074786	0,073572	18,95	42,36
28,99	30,86	28,75	29,08	0,24	1,78	0,008348	0,061210	15,31	31,95
25,68	27,85	23,81	27,75	1,87	0,1	0,078538	0,003604	20,88	16,58
36,86	27,16	36,60	26,00	0,26	1,16	0,007104	0,044615	15,95	17,97
19,26	21,15	19,13	19,56	0,13	1,59	0,006796	0,081288	16,11	48,86
20,41	20,82	18,92	20,63	1,49	0,19	0,078753	0,009210	20,99	11,85
20,88	22,05	20,73	21,92	0,15	0,13	0,007236	0,005931	15,88	14,62
20,23	23,59	20,11	23,43	0,12	0,16	0,005967	0,006829	16,54	13,86
28,41	26,16	28,26	24,62	0,15	1,54	0,005308	0,062551	16,87	33,08
26,33	23,77	24,59	23,65	1,74	0,12	0,070760	0,005074	16,87	15,34
20,55	30,81	18,77	30,63	1,78	0,18	0,094832	0,005877	29,28	14,66
25,71	22,14	25,55	22,05	0,16	0,09	0,006262	0,004082	16,38	16,17
25,68	25,82	25,56	25,71	0,12	0,11	0,004695	0,004278	17,19	16,01
23,83	35,71	22,18	33,82	1,65	1,89	0,074391	0,055884	18,74	27,46
26,88	38,05	24,92	37,92	1,96	0,13	0,078652	0,003428	20,94	16,72
27,15	27,45	26,80	27,34	0,35	0,11	0,013060	0,004023	12,88	16,22
21,36	33,59	21,24	33,51	0,12	0,08	0,005650	0,002387	16,70	17,60
32,26	26,26	29,92	26,11	2,34	0,15	0,078209	0,005745	20,71	14,77
25,89	26,77	23,25	26,63	2,64	0,14	0,113548	0,005257	38,93	15,18
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								19,41	20,68

Таблица Е.27 – Экспериментальные данные зависимости коэффициента неоднородности V_c от технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом ($d=0,12$, $A=3,5$ мм, $f=25$ Гц)

Чистый вес смеси, г		Масса фонового компонента, г		Масса ключевого компонента, г		Концентрация, %		Коэффициент неоднородности V_c , %	
Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2	Смесь №1	Смесь №2
29,56	40,28	29,46	39,01	0,10	1,27	0,003394	0,032556	17,28	3,88
33,85	36,60	32,60	36,12	1,25	0,48	0,038344	0,013289	6,73	10,02
24,85	39,30	24,48	39,08	0,37	0,22	0,015114	0,005629	9,23	15,55
26,75	31,65	25,23	30,13	1,52	1,52	0,060246	0,050448	21,77	16,79
40,02	29,05	38,77	27,82	1,25	1,23	0,032241	0,044213	2,54	12,29
26,08	26,08	25,71	25,71	0,37	0,37	0,014391	0,014391	9,73	9,23
31,69	31,69	30,41	30,05	1,28	1,64	0,042091	0,054576	9,30	19,77
29,05	29,05	28,58	28,94	0,47	0,11	0,016445	0,003801	8,32	16,87
40,09	40,09	39,80	38,93	0,29	1,16	0,007286	0,029797	14,61	1,89
23,87	23,87	22,35	22,86	1,52	1,01	0,068009	0,044182	27,10	12,27
38,06	38,06	37,80	37,80	0,26	0,26	0,006878	0,006878	14,89	14,65
28,74	28,74	28,16	28,16	0,58	0,58	0,020597	0,020597	5,46	4,75
33,28	33,28	33,15	33,15	0,13	0,13	0,003922	0,003922	16,92	16,78
33,07	33,07	32,82	32,82	0,25	0,25	0,007617	0,007617	14,38	14,11
25,02	25,01	24,06	24,05	0,96	0,96	0,039900	0,039917	7,80	9,19
40,95	26,74	39,80	25,59	1,15	1,15	0,028894	0,044939	0,24	12,82
32,96	40,02	31,70	38,16	1,26	1,86	0,039748	0,048742	7,69	15,56
24,85	35,85	24,64	35,77	0,21	0,08	0,008523	0,002237	13,76	18,00
26,78	38,06	25,66	36,81	1,12	1,25	0,043648	0,033958	10,37	4,89
33,07	32,49	32,72	32,14	0,35	0,35	0,010697	0,010890	12,26	11,75
25,03	33,85	23,71	32,58	1,32	1,27	0,055673	0,038981	18,63	8,52
24,85	24,85	24,00	24,25	0,85	0,60	0,035417	0,024742	4,72	1,76
26,74	26,74	25,78	25,92	0,96	0,82	0,037238	0,031636	5,97	3,22
40,87	40,02	39,49	39,45	1,38	0,57	0,034946	0,014449	4,39	9,19
33,89	33,88	32,69	33,52	1,20	0,36	0,036708	0,010740	5,60	11,86
25,01	24,85	24,16	24,00	0,85	0,85	0,035182	0,035417	4,56	5,95
24,85	26,78	24,18	25,14	0,67	1,64	0,027709	0,065235	0,58	27,46
Среднее значение коэффициента неоднородности $V_{c,cp}$, %								10,17	11,44

Приложение Ж

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО КемГУ

 А.Ю. Просеков


УТВЕРЖДАЮ
Директор ФГАНУ НИИХП

 М.Н. Костюченко


АКТ ИСПЫТАНИЙ ВИБРАЦИОННОГО СМЕСИТЕЛЯ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО МЕТОД
«ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РАЗБАВЛЕНИЯ»

(Патент РФ № 2626415)

Мы, нижеподписавшиеся, Невская Е.В. (к.т.н., ведущий научный сотрудник, руководитель направления микробиологических исследований), Тюрина О.Е. (к.т.н., ученый секретарь), Бородулин Д.М. (д.т.н., директор Института инженерных технологий, зав.каф. «Технологическое проектирование пищевых производств», КемГУ), Зорина Т.В. (аспирант кафедры «Технологическое проектирование пищевых производств», КемГУ) составили настоящий акт в том, что с 01 по 14 апреля были проведены производственные испытания вибрационного смесителя, реализующего метод «последовательного разбавления» (патент РФ № 2626415), при выработке мучных хлебопекарных смесей на базе ФГАНУ «Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности».

Испытания вибрационного смесителя, реализующего метод «последовательного разбавления» включили:

- Обработку на холостом ходу,
- Проверку работоспособности под нагрузкой,
- Определения качества получаемой смеси при различных количествах витков рабочего органа, отверстий на витках рабочего органа при производстве мучных хлебопекарных смесей, рецептуры которых разработаны в Центре технологий, биохимических и микробиологических исследований ФГАНУ НИИХП
- Замеры уровней вибрации и шума

Рецептура мучной хлебопекарной смеси с высоким содержанием белка представлена в таблице 1.

Таблица 1. Рецептúra мучной хлебопекарной смеси с высоким содержанием белка

Наименование сырья	Расход сырья (в кг)
Мука пшеничная хлебопекарная первого сорта	83,7
Соль пищевая	1,3
Сахар белый	1,7
Кунжутная мука	4,2
Изолят сывороточного белка	4,2
Изолят соевого белка	4,2
Клейковина сухая	0,8
Итого:	100,0

Раздел 1. Результаты испытаний

При исследовании работы вибрационного смесителя непрерывного действия, реализующего метод «последовательного разбавления» на холостом ходу в течении 2-х часов установлено:

- 1) Температура подшипниковых и сальниковых узлов не превышала 40°C.
- 2) Средства электроснабжения и автоматизации работали без отказов.

Производительность смесителя при испытании составила 200 кг/ч.

Уровень шума и вибрации находились в пределах нормы. Выделение пыли в окружающую среду не наблюдалось.

Качество смешивания определялось при помощи коэффициента неоднородности V_c по ключевому компоненту (соль пищевая), концентрацию которого определяли химическим методом, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение коэффициента неоднородности

№ повтора	Производительность смесителя, кг/ч	Удельные энергозатраты, Дж/кг	Коэффициент неоднородности ключевого компонента V_c , %
1	200	687	7,23
2	200	687	6,98
3	200	687	10,3
4	200	687	8,43
5	200	687	5,72
6	200	687	2,49
7	Сравнение значения		6,86

Из таблицы 3 видно, что коэффициент неоднородности имеет среднее значение 6,86%, что является вполне правомочным для признания полученной мучной хлебопекарной смеси с высоким содержанием белка хорошего качества, поскольку V_c не превышал 10%.

Раздел 2. Общая оценка показателей технического уровня и качества вибрационного смесителя, реализующего метод «последовательного разбавления», по результатам испытаний и соответствия требованиям технического задания.

Конструкция и основные параметры работы вибрационного смесителя, реализующего метод «последовательного разбавления», обеспечивают получение мучных хлебопекарных смесей с высоким содержанием белка и соответствуют требованиям технического задания.

Раздел 3. Выводы и предложения.

Оригинальный вибрационный смеситель, реализующий метод «последовательного разбавления» (патент РФ № 2626415) признали выдержавшим приемочные испытания. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что применение смесителя обеспечивает равномерность перемешивания ингредиентов и качества смешивания мучной хлебопекарной смеси с высоким содержанием белка по ключевому компоненту.

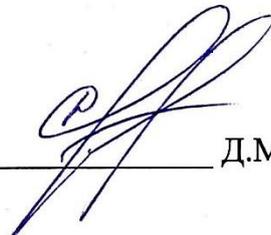
Ведущий научный сотрудник,
руководитель направления
микробиологических исследований
ФГАНУ НИИХП, к.т.н.


_____ Е.В. Невская

Ученый секретарь ФГАНУ НИИХП, к.т.н.


_____ О.Е. Тюрина

Директор Института инженерных
технологий, зав.каф. «Технологическое
проектирование пищевых производств»,
КемГУ, д.т.н.


_____ Д.М. Бородулин

Аспирант кафедры «Технологическое
проектирование пищевых производств»,
КемГУ


_____ Т.В. Зорина

Приложение И

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«КУЗБАССХЛЕБ»**

650055, Кемеровская область – Кузбасс, г. Кемерово, пр. Кузнецкий, д. 105

ИНН/КПП 4205222467/ 420501001

E-mail: kuzbasshleб@mail.ru

Сайт: <https://www.kuzbasshleб.ru>

Тел/факс: 8(3842) 28-79-11

№ 79 от 01.02.2021 г.

АКТ

**промышленных испытаний вибрационного смесителя для получения
мучных сыпучих смесей**

(Патент РФ № 2626415)

Настоящим актом подтверждается, что с 18 по 29 января 2021 г. на базе ООО «Кузбассхлеб» (г. Кемерово) были проведены опытно-промышленные испытания вибрационного смесителя, защищенного патентом РФ № 2626415, при выработке мучных сыпучих смесей для питания детей дошкольного и школьного возраста.

Опытно-промышленные испытания вибрационного смесителя включали:

1. Проверку работоспособности вибрационного смесителя при следующих технологических параметрах: угол $\beta=45^\circ$, амплитуда $A=4,5$ мм и частота колебаний $f=33,3$ Гц;

2. Определение качества мучной сыпучей смеси для питания детей дошкольного и школьного возраста, получаемой в опытном образце вибрационного смесителя.

Рецептура мучной сыпучей смеси, получаемой в опытном образце вибрационного смесителя, представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Рецепт мучной сыпучей смеси для питания детей дошкольного и школьного возраста

Наименование сырья	Расход сырья (в кг)
Мука пшеничная хлебопекарная первого сорта	74,3
Мука чечевичная цельносмолотая	9,3
Мука из бурого риса цельносмолотая	9,3
Соль пищевая	1,4
Клейковина сухая	3,8
Итого:	100,0

1. В результате проверки работоспособности вибрационного смесителя при угле $\beta=45^\circ$, амплитуде $A=4,5$ мм и частоте колебаний $f=33,3$ Гц в течении 2-х часов установлено:

- Температура подшипниковых и сальниковых узлов не превышала 40°C .
- Средства электроснабжения и автоматизации работали без отказов.

2. Качество смешивания, определяемое при помощи коэффициента неоднородности V_c по ключевому компоненту (соль пищевая), представлено в таблице 2. Производительность смесителя при испытании составила 200 кг/ч, удельные энергозатраты – 679 Дж/кг. Продолжительность смешивания составляла 5-7 мин.

Таблица 2 - Сравнение коэффициента неоднородности

№ повтора	Коэффициент неоднородности ключевого компонента V_c , %
1	10,4
2	5,79
3	9,5
4	7,34
5	6,27
6	6,68
Среднее значение	7,66

Из таблицы 2 следует, что коэффициент неоднородности имеет среднее значение 7,66%, что является вполне правомочным для признания полученной мучной сыпучей смеси для питания детей дошкольного и школьного возраста хорошего качества, поскольку V_c не превышал 10%.

Выводы: конструкция и основные параметры работы вибрационного смесителя обеспечивают получение мучных сыпучих смесей для питания детей дошкольного и школьного возраста достаточно высокого качества и соответствуют требованиям технического задания; применение смесителя обеспечивает равномерность перемешивания компонентов.

Заключение: результаты опытно-промышленных испытаний опытного образца вибрационного смесителя для получения мучных сыпучих смесей для питания детей дошкольного и школьного возраста признаны успешными.

Заместитель генерального
директора по техническим
вопросам ООО «Кузбассхлеб»



В.В. Иванов

Приложение К

**Россельхознадзор
Испытательный центр
федерального государственного бюджетного учреждения "Кемеровская межобластная ветеринарная
лаборатория"
(ИЦ ФГБУ "Кемеровская МВЛ")**

Адрес: 1) 650051 г. Кемерово, ул. Муромцева, д. 2а, тел/факс 8(3842) 28-74-10, e-mail: kemvetlab_my@mail.ru
2) 650055 г. Кемерово, ул. Федоровского, д. 11, тел/факс 8(3842) 28-03-90, e-mail: vetlab-il@rambler.ru
3) 650021 г. Кемерово, ул. Павленко, д. 3, тел/факс 8(3842) 57-20-86, e-mail: vetlab@bk.ru

Сайт: www.kemml.ru

Протокол испытаний № 3956Б от 31.05.2019

При исследовании образца: Хлеб из мучной хлебопекарной смеси с высоким содержанием белка принадлежащего: Зорина Татьяна Владимировна, Российская Федерация, Кемеровская обл., Новокузнецкий район, с. Безруково, Коммунальная ул., д. 13, 13

заказчик: Зорина Татьяна Владимировна, Российская Федерация, Кемеровская обл., Новокузнецкий район, с. Безруково, Коммунальная ул., д. 13, 13

основание для проведения лабораторных исследований: производственный контроль

дата документа основания: 21.05.2019

место отбора проб: Российская Федерация, Кемеровская обл., г. Кемерово, ул. Ворошилова, 24В

производство: Российская Федерация, Кемеровская обл., г. Кемерово, Т.В. Зорина

дата изготовления: 20.05.2019

сопроводительный документ: заявка на проведение испытаний от 21.05.2019.

масса пробы: 0,8 килограмма

дата поступления: 21.05.2019 12:00

даты проведения испытаний: 21.05.2019 - 31.05.2019

получен следующий результат:

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Результат испытаний	Погрешность (неопределенность)	Норматив	ИД на метод испытаний
Аминокислоты						
1	Массовая доля аланина	%	0,50	± 0,13	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
2	Массовая доля аргинина	%	0,41	± 0,17	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
3	Массовая доля аспарагина и аспарагиновой кислоты (суммарно)	%	менее 0,5	-	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
4	Массовая доля валина	%	0,63	± 0,25	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
5	Массовая доля гистидина	%	менее 0,5	-	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
6	Массовая доля глицина	%	0,49	± 0,17	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
7	Массовая доля глутамина и глутаминовой кислоты (суммарно)	%	менее 0,5	-	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"

8	Массовая доля лейцина и изолейцина (суммарно)	%	1,73	± 0,45	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
9	Массовая доля серина	%	0,64	± 0,17	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
10	Массовая доля тирозина	%	0,28	± 0,08	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
11	Массовая доля треонина	%	0,51	± 0,21	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
12	Массовая доля триптофана	%	0,16	± 0,05	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
13	Массовая доля фенилаланина	%	0,59	± 0,18	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
Показатели качества						
14	Массовая доля белка	%	10,16	-	-	ГОСТ 10846-91 - Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка
15	Массовая доля лизина	%	0,47	± 0,16	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
16	Массовая доля метионина	%	менее 0,25	-	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
17	Массовая доля пролина	%	1,43	± 0,37	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"
18	Массовая доля цистина	%	менее 0,1	-	-	М 04-38-2009 - Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель"

Применяемое оборудование:

№ п/п	Наименование оборудования	Дата поверки/аттестации
1	Блок озонения Bloc-Digest 6	19.03.2019
2	Весы лабораторные ВЛ	08.08.2018
3	Система капиллярного электрофореза «Капель-105 М»	21.06.2018
4	Сушильный шкаф серия FD Модель 53	19.03.2019
5	Центрифуга лабораторная настольная Mini Spin	23.01.2019

Полученные результаты распространяются только на исследуемые (исследованные) образцы. Протокол испытаний не может быть распечатан или частично воспроизведен без разрешения ФГБУ "Кемеровская МВЛ".

Заведующий отделом приема материалов

Чаплыгина Л.Л.

(подпись)

31.05.2019

Ответственный за оформление протокола: Чаплыгина Л.Л.