

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

На правах рукописи



ЮРАСКОВА Ирина Андреевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК И ИНСТРУМЕНТАРИЯ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА  
СМЕСЕЙ И КОМПОЗИТОВ**

Специальность: 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация.  
Организация производства

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Евсеев Алексей Владимирович

Тула – 2023 год

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОБЗОР И АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЕЙ И КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.	
ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	15
1.1 Классификация способов приготовления гетерогенных смесей и композитов, оборудование для их реализации .....	15
1.2 Постановка задач исследования. Концепция управляемой однородности .....	24
1.3 Концепция управляемой однородности .....	25
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЕЙ И КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ДИСКРЕТНЫХ И НЕПРЕРЫВНЫХ ПОТОКОВ КОМПОНЕНТОВ .....	
2.1 Математическое моделирование процессов дискретного дозирования компонентов.....	28
2.1.1 Многофакторный эксперимент и анализ результатов исследования загрузки сыпучих материалов роторными питателями.....	28
2.1.2 Регрессионная математическая модель работы роторных дозаторов гетерогенных компонентов для управления качеством смесей, получаемых на нонмиксерах .....	33
2.2 Математическая модель процесса формирования однородности смесей и композитов из дискретных потоков.....	35
2.3 Математическое моделирование процессов формирования однородности из непрерывных потоков.....	42
2.3.1 Математическая модель процессов формирования однородности смесей и композитов из непрерывных потоков на основе аппарата теории вероятностей .....	42

2.3.2 Математическая модель процессов формирования однородности смесей и композитов из непрерывных потоков на основе методов математического анализа.....	46
2.4 Выводы по главе .....	49
<b>3 ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ГЕТЕРОГЕННЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА УПРАВЛЯЕМОЙ ОДНОРОДНОСТИ .....</b>	<b>50</b>
3.1 Обоснование однородности как основного показателя качества гетерогенных композиций .....	50
3.2 Критерии оценки качества гетерогенных композиций и композитных материалов на основе принципа управляемой однородности.....	58
3.2.1 Критерий оценки управляемой однородности гетерогенных смесей и композитных материалов, синтезируемых из дискретных потоков компонентов .....	58
3.2.2 Критерий оценки управляемой однородности гетерогенных смесей и композитных материалов, синтезируемых из непрерывных потоков компонентов.....	61
3.3 Выводы по главе .....	65
<b>4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЯЕМОГО ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОРОДНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЕЙ И КОМПОЗИЦИЙ .....</b>	<b>66</b>
4.1 Экспериментальное оборудование для синтеза гетерогенных смесей и композитных материалов из дискретных и непрерывных потоков компонентов .....	66
4.2 Экспериментальные исследования работы дискретных и непрерывных дозирующих устройств .....	68
4.2.1 Результаты экспериментальных исследований дозирования некоторых компонентов шнековыми питателями, формирующих их непрерывные потоки .....	68

4.2.2 Результаты экспериментальных исследований дозирования некоторых компонентов роторными питателями, формирующих их дискретные потоки .....	70
4.3 Результаты экспериментальных исследований получения гетерогенных смесей и композитов из дискретных и непрерывных потоков компонентов .....	75
4.3.1 Получение смеси длинномерной (штучной) продукции с соотношением компонентов до 1:10 .....	75
4.3.2 Получение композитных бетонов с соотношением компонентов до 1:10 .....	78
4.3.3 Получение композитных порошковых смесей для изготовления абразивного инструмента на основе медных связок с соотношением компонентов до 1:50 .....	82
4.3.4 Получение сбалансированных премиксов с соотношением компонентов до 1:200 .....	86
4.4 Сравнение абсолютных и относительных показателей качества смесей и композитов, полученных при традиционном и управляемом формировании однородности .....	91
4.5 Верификация разработанных критериев оценки качества гетерогенных композиций при экспериментальном исследовании управляемого формирования их однородности .....	95
4.5.1 Верификация разработанных критериев оценки качества гетерогенных композиций при экспериментальном исследовании управляемого формирования их однородности для дискретных потоков компонентов .....	97
4.5.2 Верификация разработанных критериев оценки качества гетерогенных композиций при экспериментальном исследовании управляемого формирования их однородности для непрерывных потоков компонентов .....	100
4.6 Выводы по главе .....	102

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	104
СПИСОК ТЕРМИНОВ .....	110
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	111
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	127
Приложение А .....	128
Приложение Б .....	132
Приложение В .....	138

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Приготовление однородных по составу гетерогенных композиций из различных по своей морфологии компонентов является широко используемым технологическим процессом. Приготавливаемые смеси и композиты характеризуются широким диапазоном соотношений составляющих их компонентов и состоят из материалов, обладающих различными физико-механическими и химическими свойствами.

Эти обстоятельства делают невозможным обеспечение упорядоченной структуры и гарантированного уровня качества смесей и композитных материалов при использовании традиционных технологий смешения, которые ориентированы на стохастическое формирование однородности.

В различных отраслях промышленности наблюдается тенденция увеличения доли используемой смесевой и композитной продукции и повышения требований к уровню ее качества. Рынок смесей и композитов различного применения в РФ постоянно увеличивается и его ежегодный рост, по разным оценкам [155-156], составляет от трех до пяти процентов в год. Поэтому в современных рыночных условиях наиболее **актуальными** являются разработки в области создания новых технологических машин, реализующих управляемое формирование однородности с гарантированным уровнем показателей качества, и создание соответствующего метрологического обеспечения производства гетерогенных композиций на основе новых критериев оценки их качества.

Современные требования, предъявляемые к смесевым продуктам и композитным материалам продиктованы не только отраслевыми стандартами, но и постоянно меняющимися предпочтениями конечного потребителя, что в свою очередь, ужесточает соответствующие технические и технологические регламенты на продукцию, а иногда делает невозможным их реализацию при использовании традиционных технологий смешения.

Эта задача имеет межотраслевую направленность и требует решения в пищевой, комбикормовой, инструментальной, химической, горно-рудной,

металлургической, строительной и других отраслях промышленности, а также на предприятиях оборонно-промышленного комплекса для обеспечения высокоэффективного конечного использования гетерогенных композиций.

В современных условиях, когда становится востребованным все более высокий уровень качества смесевой и композитной продукции необходимо создавать новые виды методов контроля и управления качеством продукции для обеспечения реализации возрастающих потребностей потребителя [8,14,42,47,52,68-72].

Наиболее перспективным направлением в решении данной научно-технической задачи является создание нового класса технологических машин – нонмиксеров, которые реализуют технологию детерминированного формирования однородности получаемых гетерогенных смесей и композитов более высокого качества и с высокими соотношениями компонентов, а также разработку соответствующих критериев анализа, оценки и управления однородностью производимых композиций и разработку программного обеспечения для реализации данных научных положений в условиях реальных производственных процессов.

Таким образом, актуальной является научная задача совершенствования инструментария обеспечения качества гетерогенных смесей и композитов с управляемой однородностью, соответствующая Разделу II государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности» на период до 2024 года включительно, утвержденной постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 года № 328 при участии Министерства образования и науки РФ [107]. Решению данной задачи и посвящено выполненное диссертационное исследование.

**Степень разработанности темы.** Теоретическое обоснование управляемого формирования однородности смесей и композитов с целью повышения их качества рассматривалось в работах отечественных ученых: Айдарова Д.В., Амирова Ю.Д., Анцева В.Ю., Бойцова Б.В., Баранцевой Е.А. [9], Благовещенского Д.И., Васильева В.А., Васина С.А. [13-14], Верлоки И. И. [16,52-

54], Евсеева А.В. [43-46,67], Ивахненко А.Г., Капрановой А.Б. [51-54,132], Козловского В.Н. [99], Макарова Ю.И. [68-70], Мизонова В.Е., Пантюхина О.В., Плахотниковой Е.В., Першина В.Ф. [3,83,94,100,136], Подгорнова Ю.И. и др., а также зарубежных специалистов: Деминга Э., Исикавы К., Тагути Г., Фейгенбаума А., Arratia P.E., Gayle J.B., Khan Z.S., Otake T., Stange K. [125,127,133,143] и др. Но оно было сформулировано как возможное и рекомендательное для дальнейшего теоретического описания и практической реализации. Анализ этих исследований показывает, что решение задач получения заданной однородности при смешении гетерогенных сред затруднено прежде всего тем, что данные процессы, реализуемые традиционными методами, носят исключительно вероятностный характер и поэтому трудноописуемы и трудноуправляемы.

Впервые, в шестидесятые годы прошлого века под руководством Чувпило А.В. и Макарова Ю.И. были созданы усовершенствованные смесительные аппараты непрерывного действия, позволяющие существенно повысить качество смеси за счет формирования тонкодозированных потоков составляющих компонентов и внедрения их друг в друга во время непрерывного транспортирования в аппарате [67-70,114]. Показатели качества получаемых на них смесей и композитов существенно улучшились и достигли уровня в 2-4% по коэффициенту вариации, при соотношении компонентов не более 1:10. Однако современные запросы потребителей требуют улучшение данных показателей до уровня 0,5-1,5%, 1:100 и выше соответственно.

Позже в работах Першина В.Ф., Мизонова В.Е., Капрановой А.Б. были сформулированы основные направления качественного перехода от стохастической природы процессов смешения к детерминированным. Практическая реализация процессов детерминированного формирования однородности гетерогенных сред была достигнута в работах Евсеева А.В. Однако при этом возникла **актуальная** задача создания методологии критеральной оценки показателей качества данных продуктов в зависимости от специфики



генерирующих смеси и композиты потоков компонентов и различных типов устройств, используемых при их производстве.

Внедрение разработок, полученных при решении вышеуказанной проблемы, позволит снизить себестоимость получаемой продукции, повысить ее качество, а также обеспечить возможность анализировать и управлять этим качеством.

Поэтому автором были разработаны научно-практические критерии оценки качества смесей и композитов, применение которых в условиях реальных производств позволит не только получать смеси и композиты более высокого качества, но и иметь возможность управлять процессом в целом.

**Целью исследования** является обеспечение качества смесей и композитов за счет совершенствования методик и инструментария управления процессами их производства.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи исследования:**

1. Разработана обобщенная концепция формирования управляемой однородности (качества) смесей и композитов.
2. Разработаны математические модели процессов производства однородных смесей и композитов из дискретных и непрерывных потоков компонентов.
3. Разработаны критерии оценки качества смесей и композитов, производимых из дискретных и непрерывных потоков компонентов.
4. Проведены экспериментальные исследования процессов приготовления смесей и композитов с применением разработанных критериев оценки качества смесей и композитов.
5. Разработана обобщенная методика обеспечения качества смесей и композитов и реализующее ее программное обеспечение.
6. Комплексная апробация предложенных научно-технических решений при производстве смесей и композитов различного назначения.

**Объект исследования** – процессы контроля и управления качеством производства гетерогенных смесей и композитных материалов.

**Предмет исследования** – критерии оценки качества смесей и композитов при организации их производства на основе концепции управляемого качества.

**Соответствие паспорту научной специальности** – содержание диссертации соответствует п. 1 «Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические информационные модели состояния и динамики процессов управления качеством и организации производства», п. 3 «Научные основы и совершенствование методов стандартизации менеджмента качества (контроль, управление, обеспечение, повышение, планирование качества) объектов и услуг на различных стадиях жизненного цикла продукции» и п. 23. «Разработка и совершенствование методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами» паспорта научной специальности 2.5.22 «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства».

**Научная новизна** исследования состоит в разработке комплексных инструментов мониторинга и управления качеством смесей и композитов, включающих:

1. Концепцию формирования управляемой однородности (качества) при производстве смесей и композитов.

2. Математические модели процессов производства смесей и композитов из дискретных и непрерывных потоков компонентов, которые отличаются от известных обеспечением возможности управления показателями их качества, за счет учета некоторых параметров и режимов работы оборудования при их синтезе.

3. Критерии оценки качества смесей и композитов, производимых из дискретных и непрерывных потоков компонентов, которые построены на основе разработанных математических моделей, и в отличие от известных критериев адаптированы не только для опосредованного анализа получаемых показателей

качества композиций, но и позволяют управлять реальными процессами производства композитов, обеспечивая их гарантированные показатели качества.

4. Обобщенную методику обеспечения качества смесей и композитов, отличающаяся от известных обоснованием целевых значений показателей качества продукции и параметров режимов работы оборудования для различных видов производственных процессов.

**Теоретическое значение результатов работы** заключается в том, что разработанная концепция получения управляемой однородности гетерогенных смесей и композитных материалов позволяет экстраполировать ее использование с высокой эффективностью на многие научно-технические приложения, в том числе и при проектировании новых технологических процессов и оборудования.

**Практическая значимость результатов работы.** Разработаны методики и инструменты метода обеспечения и управления качеством получаемых смесей и композитов на новом классе технологических машин – нонмиксерах, по сравнению с традиционными методами их производства. Разработаны критерии анализа, контроля и обеспечения управления качеством для процессов синтеза гетерогенных композиций из дискретных и непрерывных потоков компонентов, при практическом метрологическом сопровождении соответствующих технологических производств.

На устройство получения гетерогенных композиций и способ контроля их качества подано 2 заявки на изобретение, также получено свидетельство на программу для ЭВМ № 2023611457.

**Реализация результатов работы.** Критерии оценки качества смесей и композитов, производимых из дискретных и непрерывных потоков, методики исследования и анализа показателей готовой продукции переданы для практической реализации и нашли применение в ООО «Биохим-ТЛ» (премиксы), ООО «ГИПЕРИОН» и ООО «Аврора» (производство строительных смесей и строительство), с ежегодным экономическим эффектом от 0,8 до 4,0 млн. рублей, а также используются в учебном процессе на кафедрах Политехнического института Тульского государственного университета.

**Методология и методы диссертационного исследования, использованные** в работе, заключаются в сочетании аналитических и экспериментальных исследований процессов дозирования, нонмиксинга и анализа качества получаемых гетерогенных смесей и композитов с использованием математических, компьютерных и натуральных моделей. Построение математических моделей и процессов базировалось на методах теории вероятностей, линейного программирования и общих физических законов. Дифференциальные и интегральные зависимости решались численными методами, в том числе с помощью вычислительных систем. При проведении экспериментальных исследований процессов дозирования и нонмиксинга использовались специальные стенды, современная измерительная аппаратура и приборы, а также регрессионный анализ, статистические методы обработки результатов экспериментов и современное программное обеспечение.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Концепция формирования управляемой однородности (качества) смесей и композитов.
2. Математические модели процессов производства смесей и композитов из дискретных и непрерывных потоков компонентов.
3. Критерии оценки качества смесей и композитов.
4. Обобщенная методика обеспечения качества смесей и композитов.
5. Результаты комплексной апробации предложенных научно-технических решений.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается глубокой и детальной проработкой литературных источников по теме диссертации, постановкой разноплановых экспериментов, применением современных инструментальных методов их анализа и математической обработкой его результатов.

**Апробация результатов.** По теме диссертации и основным результатам опубликована 14 научных работ: 5 из них в перечне ВАК, подано 2 заявки на изобретение РФ и получено свидетельство на программу для ЭВМ.

Основные научные положения диссертации, результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались научно-технических конференциях: на научно-технической конференции «Инновационные наукоемкие и информационные технологии» (Тула, 28 октября 2022 года), на 59-ой научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием (Тула, 09-12 февраля 2023 года)), на 13-й Международной научно-технической конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства (Омск, 15-18 марта 2023 года), на IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 18-20 апреля 2023 года), на 76 Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием (Ярославль, 19-20 апреля 2023 года), на Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (Сочи, 15-19 мая 2023 года), на Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова (Белгород, 16-17 мая 2023 года), на VII Международной научно-технической конференции «Проблемы машиноведения» (Омск-Ташкент, 16-17 мая 2023 года).

**Личный вклад соискателя.** Постановка задач осуществлялась совместно с научным руководителем. Теоретические и практические исследования автором выполнены самостоятельно.

Личный вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве: в работе [14] – в теоретическом обосновании создания критериев оценки качества гетерогенных композиций, на основе концепции управляемой однородности; в работе [13] – в обосновании методов практической реализации нонмиксинга; в работе [46] – в определении частных случаев реализации управления качеством производства гетерогенных смесей и композитов; в работе [57] – в разработке новой конструкции роторного нонмиксера; в работе [122] – в проведении экспериментальных исследований дозирования некоторых компонентов с

различными физико-механическими свойствами с помощью дискретных роторных питателей; в работе [121] – в разработке общих принципов построения концепции формирования управляемой однородности смесей и композитов, как теоретической базы для решения научно-практической задачи управления качеством производства гетерогенных композиций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и общих выводов, библиографического списка из 157 наименований и приложений. Работа содержит 110 печатных страниц, 36 рисунков, 23 таблицы. Общий объем работы составляет 139 страниц. Объем приложений 12 страниц.

В приложениях представлены материалы и документы, свидетельствующие о практическом использовании и новизне результатов исследований и разработок автора, а также дополнительные материалы, отражающие специфику решаемой проблемы.

# **1 ОБЗОР И АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЕЙ И КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В главе проведен обзор способов и оборудования для приготовления гетерогенных смесей и композитных материалов, систематизированы литературные и патентные данные по данному научно-техническому направлению, рассмотрены некоторые аспекты управления качеством гетерогенных смесей и композитных материалов.

## **1.1 Классификация способов приготовления гетерогенных смесей и композитов, оборудование для их реализации**

Для различных отраслей производства актуальна задача проектирования и модернизации оборудования для приготовления многокомпонентных гетерогенных смесей и композитов. Ученые, в ходе ее решения, сталкиваются с задачами оценки качества смесевых композиций, включающими вопросы оценки качества осуществляемого устройством перемешивания. В некоторых случаях они связаны с тем перемешиванием, в результате которого различные по прочим признакам и первоначально разделенные фракции частиц распределяются в единой, конечной композиции однородно. Тогда перемешивание называют смешением, его результат смесью [1-5,15-17,43-45,51,58-59,61-63,67-68,105-106,114-116].

В области приготовления смесей основополагающие исследования и теоретические разработки принадлежат Макарову Ю.И., Александровскому А.А., Чувпило А.В., Кольман-Иванову Э.Э., Кафарову В.В., Ахмадиеву Ф.Г., Ластовцеву А.М., Дорохову И.Н., Баранцевой Е.А., Капрановой А.Б., Мизонову В.Е., Першину В.Ф., Таршису М.Ю., Carr R.L., Stange K., Otake T., Kitaoka X., Ashton M.D., Gayle J.B., Fan L.T., Shin S.H., Griffin M.J., Marinescu, Loan D., Wang S.L. и многим другим. В области создания и производства композиционных

материалов основные разработки принадлежат российским ученым: Айдарову Д.В., Амирову Ю.Д., Бойцову Б.В., Бранцевой Т.В., Васильеву В.А., Васину С.А. [13-14], Евсееву А.В. [43-46,67], Ивахненко А.Г., Капрановой А.Б. [51-54,132], Карпиносу Д.М., Керберу М.Л., Козловскому В.Н. [99], Красновскому А.Н., Макарову Ю.И. [68-70], Мизонову В.Е., Николаеву А.Ф., Пантюхину О.В., Плахотниковой Е.В., Першину В.Ф. [3,83,94,100,136], Протасову В.Д., Хинту Й.А. и др., а также зарубежным специалистам: Демингу Э., Исикавы К., Тагути Г., Фейгенбаума А., Goldsworthy W.B., Kelly A., Kwolek S.L., Hayashi T., Kelly A., Hashin Z., Tsai S., Sivasubramanian P., Szymański R. и др.

Композиные материалы (композиты) получили широкое применение благодаря своим специальным свойствам и высоким эксплуатационным характеристикам. Они представляют собой многокомпонентный материал, изготовленный из двух или более компонентов с существенно различными физическими и/или химическими свойствами, которые, в сочетании, приводят к появлению нового материала с характеристиками, отличными от характеристик отдельных компонентов [145].

Наука о композиционных материалах возникла на стыке различных областей знаний. Разработка принципиально новых материалов с необходимым комплексом свойств, методов их расчета и технологий производства лежала в основе прогресса много отраслей [12,55,112,135,140,145].

Компонентами композитов являются самые разнообразные материалы – металлы, керамика, стекла, пластмассы, углерод и т.п. Известны многокомпонентные композиционные материалы – полиматричные, когда в одном материале сочетают несколько матриц, или гибридные, включающие в себя разные наполнители. Наполнитель определяет прочность, жесткость и деформируемость материала, а матрица обеспечивает монолитность материала, передачу напряжения в наполнителе и стойкость к различным внешним воздействиям.

Сегодня смеси и композитные материалы являются полноценной индустрией, на которую ориентированы различные отрасли промышленности.



Кроме авиационно-космической, ракетной и других специальных отраслей техники, композитов используются в машиностроении, строительстве, медицине, автомобильной и химической промышленности [13,14,56,65,67,71,74,114,118,141].

В связи с постоянным расширением сферы применения смесей и композитных материалов, возрастают требования к их качеству. Контроль качества определяется типом материала и необходим на каждом этапе производственного процесса, включая в себя входной контроль сырья, пооперационный контроль продукции и соблюдения установленного технологического режима, приемочный контроль готовой продукции контроль производства, проверку на наличие дефектов [8,10,28,37,39,40,42,47-48,6,123,128,129,138].

Приготовление гетерогенных смесей и композитов является распространенным технологическим процессом, востребованным в различных отраслях промышленности. Компоненты, их составляющие, имеют границу раздела фаз и могут быть различны по размеру, физико-механическим и химическим свойствам. Приготовление таких смесей возможно различными способами. Наиболее общие классификации традиционного смесительного оборудования построены на разделении по конструктивному признаку [86,108] или принципу организации технологического процесса [106] (рисунок 1.1).

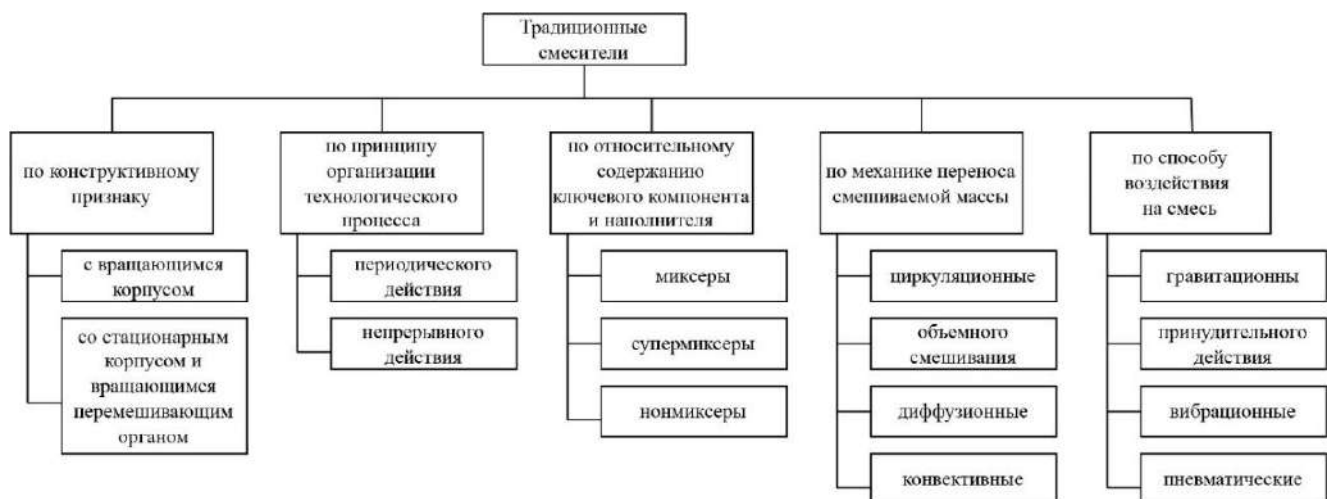


Рисунок 1.1 – Классификация смесительного оборудования

Традиционный способ – смешение путем перемещения частиц в рабочем объеме смесителя. Под смешением понимают технологический процесс, в результате которого первоначально находящиеся отдельно компоненты после равномерного распределения каждого из них в смешиваемом объеме материала образуют однородную смесь [68].

По конструктивному признаку выделяют смесители с вращающимся корпусом, со стационарным корпусом и вращающимся перемешивающим органом. В свою очередь смесители с неподвижным корпусом по расположению рабочих узлов: горизонтальные, вертикальные.

По принципу организации технологического процесса: смесители периодического и непрерывного действия. В смесителях периодического действия смешение компонентов осуществляется в ограниченном объеме (не превышающем  $5 \text{ м}^3$ ) до достижения требуемой степени однородности. В смесителях непрерывного действия потоки смешиваемого материала подвергаются смешению в процессе перемещения от загрузочного к разгрузочному устройству [4-5]. По сравнению со смесителями периодического действия имеют более высокую производительность при снижении удельных энергозатрат, себестоимости готового продукта и более широкие возможности по автоматизации процесса.

По механике переноса компонентов можно выделить смесители циркуляционного, объемного, диффузионного, конвективного смешивания.

В циркуляционных устройствах основной поток частиц движется по замкнутому контуру, образованному соединением отдельных рабочих зон. Объемное смешение заключается в перемещении и последующем разрушении блоков частиц рабочим органом [106]. Диффузионный механизм смешения основан на увеличении прозрачности материала и свободном перемещении частиц за счет вибрации или псевдооживления. Конвективное смешение реализуется путем одновременного перемещения и внедрения частиц [64].

По способу перевода компонентов во взвешенное или разряженное состояние можно выделить смесители: гравитационные, принудительного

действия, вибрационные, пневматические. В гравитационных смесителях смешение происходит от столкновений определенных объемов частиц, поднимаемых вверх [5]. Принудительное действие основано на механическом движении рабочих органов и корпуса смесителя. При вибрационном смешении перемещение компонентов обеспечивают возвратно-поступательное движение рабочего органа без применения подвижных механических устройств [61-62]. В пневмосмесителе частицы поднимаются под воздействием энергоносителя, перемешивание в слое осуществляется увеличением скорости воздуха.

Частные классификации рассматривают конкретные типы смесителей: с подвижной лентой [7], гравитационные [5,16-17], вибрационные [61-62].

Современное смесительное оборудование оснащается устройствами, выполняющими совмещенные процессы, такие как сушка, измельчение, увлажнение, выведение пыли, уплотнение, разрыхление, аэрация, гранулирование.

Традиционный стохастический способ приготовления смеси не позволяет достигать гарантированной однородности. Обеспечение заданных гарантированно высоких качественных характеристик готового смесового продукта возможно при отказе от существующих стохастических технологий приготовления смесей в пользу их управляемого формирования.

Принципиально новый подход к формированию однородности и соответствующие устройства были представлены Макаровым Ю.И., Чувпило А.В. [67-70,114]. Решая задачу обеспечения высокого качества электротехнических смесей для солнечных батарей космических летательных аппаратов, были проведены первые научные разработки и промышленные испытания установки УНДС (рисунок 1.2), осуществляющей подачу компонентов шнековыми питателями тонкодозированными потоками, а не большими объемами. Это позволило обеспечить значительное улучшение качества получаемой смеси, коэффициент неоднородности составил 1,5–2,0%.

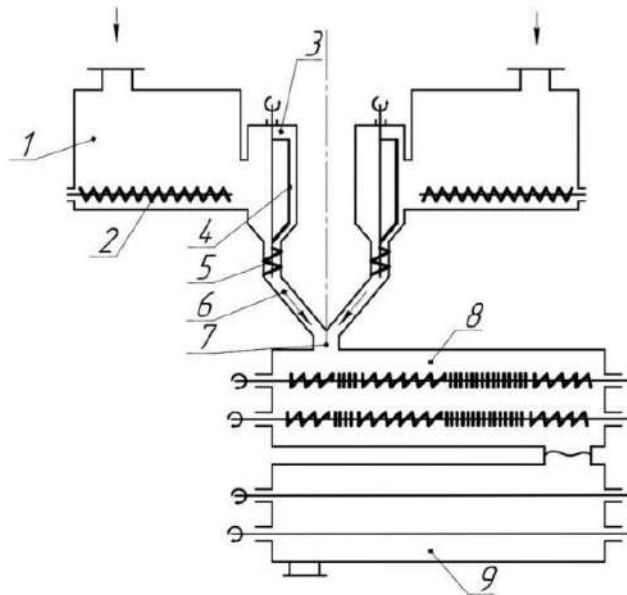


Рисунок 1.2 – Схема установки УНДС:

- 1 – бункеры хранения, 2 – шнеки, 3 – бункеры-дозаторы,  
 4 – ворошители, 5 – шнеки тонкоструйных дозаторов, 6 – лотки,  
 7 – приемная камера, 8 – секция сухого смешения порошков смесителя,  
 9 – секция увлажненного смешения

Проекты по созданию экспериментальных и промышленных установок для приготовления высококачественных смесей сыпучих и штучных компонентов реализовывали Клусов И.А., Лукаш А.Н. [58,67,77,78]. Теоретическое обоснование детерминированного формирования однородности смесей рассматривалось в работах Макарова Ю.И. [68-70], Капрановой А.Б. [51-53,88], Мизонова В.Е., Першина В.Ф. [3,83,92,94,100], Евсеева А.В. [43-45,67,77,78,90,91,93] и др.

Технология получения смеси путем упорядоченного распределения компонентов друг относительно друга при их гарантированном соотношении – нонмиксинг [44] позволяет на практике получать высококачественные смеси различных фракций компонентов. Предлагаемые устройства, синтезирующие смеси заданного качества – нонмиксеры [77-78,90-91,93,99], обеспечивают уровень отклонения содержания ключевого компонента не более 0,5–2%, а также позволяют получать требуемую рецептуру с необходимой вероятностью.

Различные конструкции нонмиксеров предназначены для производства различных типов смесей. Конвейерные варианты нонмиксеров, представленные на рисунке 1.3, обеспечивают синтез смеси с управляемой однородностью за счет наложения слоев гетерогенных компонентов друг на друга, образуя непрерывную «слоеную ленту» общей толщины от сотых долей до нескольких миллиметров для сыпучих и 3–12 слоев для штучных компонентов.

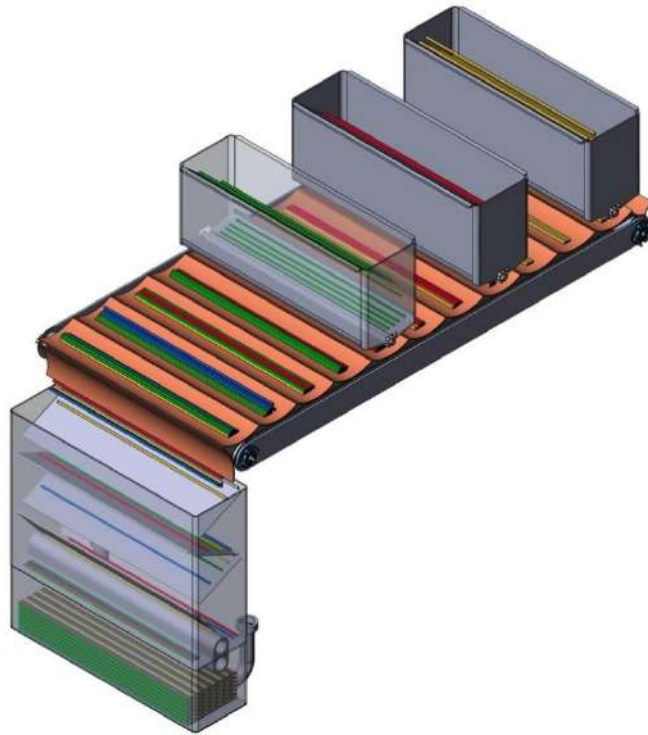


Рисунок 1.3 – Конвейерный нонмиксер

Второй вариант конструкции нонмиксера представляет роторный модуль (рисунок 1.4), который с помощью кинематики обеспечивает распределение смеси в цилиндрической таре в виде «слоеных» дисков (рисунок 1.5), за счет расположенных сверху дозирующих устройств.

Синтез смеси порошковых материалов с управляемой однородностью возможно на бироторном нонмиксере (рисунок 1.6). Роторный модуль за счет расположенных сверху дозирующих устройств и сложной кинематики обеспечивает распределение смеси в цилиндрической таре в виде «слоеных» дисков, разбитых на сектора, в которых слои компонентов располагаются в различной последовательности.

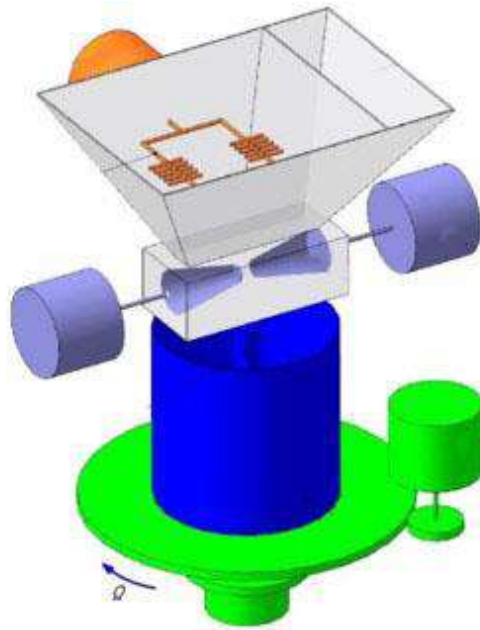


Рисунок 1.4 – Роторный нонмиксер

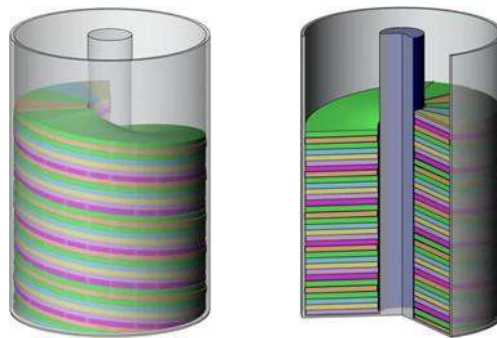


Рисунок 1.5 – Схема формирования смеси в таре роторного нонмиксера

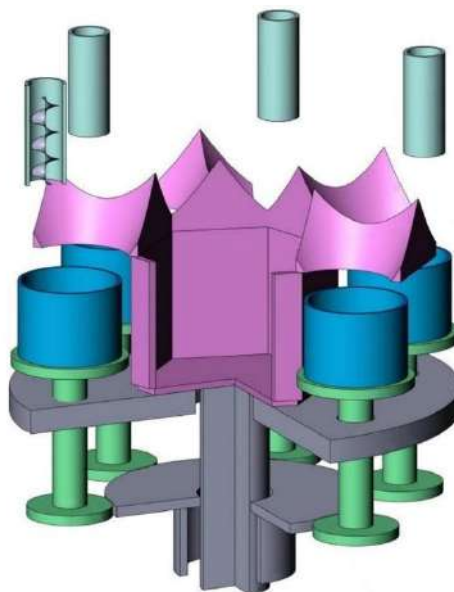


Рисунок 1.6 – Бироторный нонмиксер

В отличие от существующих традиционных технологий смешения, при нонмиксинге в зависимости от типа питателей-дозаторов компоненты подаются дискретными микродозами или тонкоструйными потоками, внедрение компонентов происходит на уровне микродоз и носит гарантированный характер, обеспечивая, таким образом, необходимый уровень качества готовой смеси. Кроме того, использование нонмиксеров позволяет увеличить скорость производства смесей, повышение экологической и пожарной безопасности за счет исключения дополнительного пыления и нагрева. Сравнение традиционного оборудования и нонмиксеров представлено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры оборудования для приготовления смесей

Параметры	Традиционные смесители [147,149,150]	Нонмиксеры
Соотношение компонентов	1:10	1:20 и выше
Уровень отклонения содержания ключевого компонента, %	2,0 и выше	0,5 и выше
Средняя потребляемая мощность, кВт	4–10	1,5
Процесс формирования смеси	стохастический	детерминированный

Технические решения, позволяющие управляемо формировать смесь, являются наиболее перспективными. В этом случае гарантированная концентрация ключевого компонента в единице продукции достигается при минимальном его содержании во всем объеме, что обеспечивает сразу несколько технико-экономических эффектов: повышение качества продукта и как следствие повышение конкурентоспособности на смесевой продукции рынке, уменьшение необходимых производственных площадей и потребление энергоресурсов, улучшение экологических показателей производства в целом, безопасность эксплуатации.

## 1.2 Постановка задач исследования

Управление качеством является основополагающим процессом современного производства, обобщающим факторы, определяющие характеристики конечного продукта. В промышленности для их выявления используют концепцию всеобщего управления (Total Quality Management, TQM). Она предполагает непрерывное совершенствование технологии за счет линейного контроля выпускаемой продукции каждым сотрудником. Качество обеспечивается путем совершенствования звеньев производственной цепи, проверки используемого сырья, контроля жизненного цикла продукции на всех этапах, а также эффективного управления и улучшения условий труда [6,50,75]. Данная концепция может быть использована как на этапе внедрения нового оборудования, так и в уже функционирующем процессе производства.

Рассмотрим возможность применения принципов TQM для формирования системы факторов, позволяющей осуществлять управление качеством гетерогенных композиций и композитов, получаемых на нонмиксерах. В рамках используемого подхода под качеством понимается соответствие смеси запросам потребителей [39], контроль производится с помощью оценки ее однородности.

Получение смесей на нонмиксерах – сложный технологический процесс. Его подготовительный этап может включать хранение компонентов, составление рецептур, анализ технологических свойств сырья (плотности, сыпучести, гранулометрического состава, влажности и т.п.) и дополнительные операции (просеивание, взвешивание, сушка, дробление) [116].

В отличие от классических смесителей, нонмиксеры осуществляют синтез сочетания фракций, что обеспечивает гарантированное постоянство однородности. Непосредственно процесс производства заключается в подаче компонентов в рабочий объем нонмиксера дискретными микродозами или тонкоструйными потоками (в зависимости от типа питателей-дозаторов).



### 1.3 Концепция управляемой однородности

Решение поставленных выше задач потребовало разработки концепции формирования управляемой однородности (качества), производимых смесей и композитов, построенной на инструментарии и принципах TQM, общие положения которой изложены ниже.

Для выявления взаимосвязи между факторами технологического процесса и однородностью получаемой смеси воспользуемся диаграммой Исикавы. Среди прочих [75] наглядных методов анализа она позволяет устанавливать причинно-следственные связи.

Как правило, факторы распределяют по группам: материалы, оборудование, технология, измерения, персонал. Выделим для каждой из них факторы процесса производства гетерогенных смесей первого порядка, определяющие качество готовой смеси.

Под «материалами» будем понимать компоненты смеси. Физические и химические свойства которых, а также условия хранения, нормы складирования, сроки годности безусловно влияют на характеристики готовой продукции [68].

В группе «технология» учтен порядок укладки микродоз, устанавливаемый в соответствии с особенностями производства смесей в зависимости от рецептуры (количества компонентов, концентраций).

В группе «оборудование» выделена скорость работы, определяющая производительность. Технические и технологические особенности используемого оборудования накладывают ограничения на показатели качества. Точность работы дозирующих устройств определяет однородность смеси, и, следовательно, ее качество.

Под «измерениями» понимается входной, организационный и окончательный контроль и испытания, которые включают способы определения и анализа показателей качества, метрологическое обеспечение и испытательное оборудование.

«Персонал» – группа экономического и организационного характера, которая может включать рабочее место, квалификацию работников, принципы управления.

Рассмотренные факторы можно отобразить в виде диаграммы, представленной на рисунке 1.7.

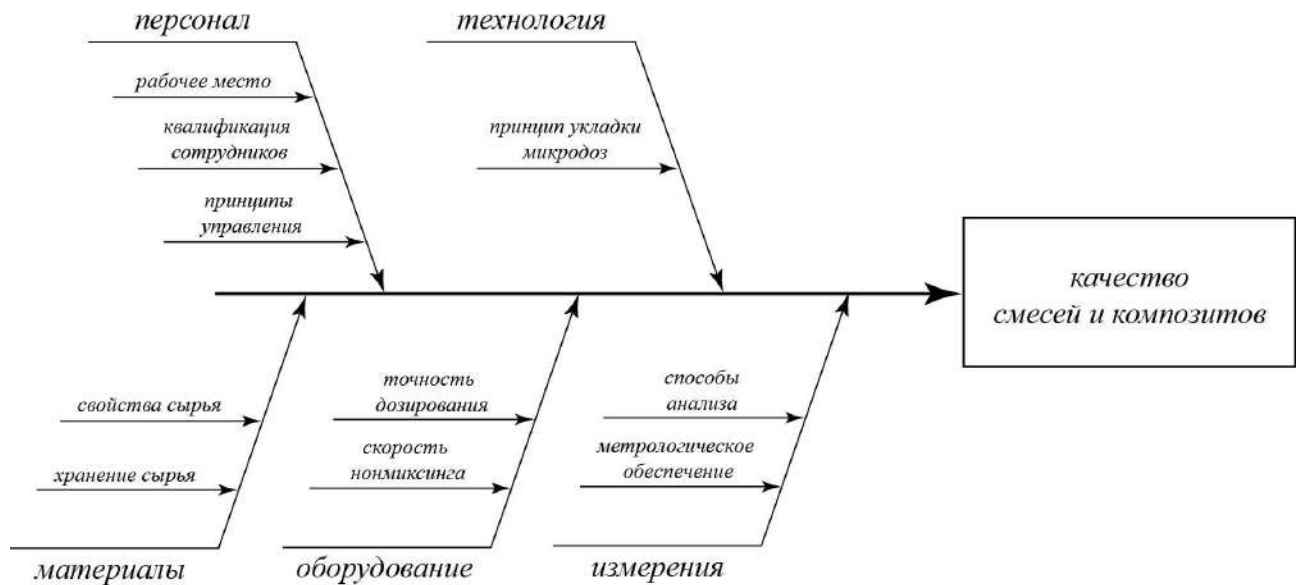


Рисунок 1.7 – Диаграмма Исикавы для процесса производства гетерогенных смесей на нонмиксерах

С учетом особенностей конкретного технологического процесса, имеющегося оборудования, принципов управления каждая из групп может быть дополнена, а также уточнена факторами второго порядка. Выделить аспекты, которые оказывают наибольшее влияние на качество конечного продукта, позволяет ранжирование с помощью диаграммы Парето [75].

В меньшей степени на результаты проводимого анализа влияют экономические и организационные характеристики реальных производственных процессов. Как правило, для технологических процессов их доля не превышает 20–30% от общего числа факторов.

Рассмотренная система факторов позволяет выявлять причины, препятствующие обеспечению гарантированного уровня качества гетерогенных смесей и композиций, разрабатывать рекомендации по управлению качеством

продукции и может быть использована как элемент системы менеджмента качества (СМК) [40]. Достижимая при таком подходе технологическая прозрачность дает возможность быстрее выявлять дефекты и недостатки предлагаемых способов нонмиксинга, а также устанавливать причины их возникновения. Методы анализа производства и управления качеством гетерогенных смесей и композитов, приближенные к общим принципам TQM и СМК, можно выделить и обобщить в концепцию формирования управляемой однородности (качества), которая позволяет в значительной степени повысить общий уровень качества смесей и эффективность их конечного использования. Дальнейшие исследования процессов производства гетерогенных смесей на нонмиксерах позволят получать комбинации факторов и групп факторов, определяющих реальные процессы формирования заданной однородности, а также выявлять их закономерности и возможные способы управления качеством в рамках применяемых общих законов TQM. Здесь следует также учитывать широкую морфологию возможных вариантов нонмиксинга, которая в свою очередь позволит охватывать все более широкий спектр методов концепции всеобщего управления качеством, обеспечивая таким образом максимальное приближение их результатов к конечному потребителю, что является одной из основных задач концепции.

## **2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЕЙ И КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ДИСКРЕТНЫХ И НЕПРЕРЫВНЫХ ПОТОКОВ КОМПОНЕНТОВ**

В главе представлено математическое обоснование процессов управляемого формирования однородности гетерогенных смесей и композитных материалов из компонентов различных физико-химических свойств и фракций. Синтез указанных продуктов осуществляется на новом классе оборудования – нонмиксерах [13,43,44,77,78,90,91,93,118-121,142], реализующих детерминированное формирование однородности гетерогенных композиций из дискретных и непрерывных потоков компонентов различными видами дозирующих устройств.

### **2.1 Математическое моделирование процессов дискретного дозирования компонентов**

Дискретное дозирование является наиболее перспективным с точки зрения детерминированного формирования потоков компонентов, поскольку позволяет с высокой вероятностью дифференцировать из общей массы компонентов некие микродозы [44], из которых в дальнейшем можно скомпилировать (собрать) потоки, с возможностью управляемого формирования однородности гетерогенных смесей и композитных материалов уже из нескольких таких потоков [118,120,121].

#### **2.1.1 Многофакторный эксперимент и анализ результатов исследования загрузки сыпучих материалов роторными питателями**

Поэтому автор посчитал целесообразным представить в работе результаты многофакторного эксперимента [122] по дозированию некоторых компонентов роторными питателями новой конструкции [91], различных типоразмеров и при

разных режимах, а также провести анализ данных проведенных экспериментальных исследований, разработать адаптированные регрессионные математические модели и некоторые выводы по проектированию, изготовлению и эксплуатации роторных конических дозаторов, влияющих на показатели качества и количества получаемых гетерогенных композиций для различных областей использования. Поэтому основной целью экспериментов является подтверждение теоретических разработок [44,45,91,99,117].

Использование роторных (барабанных) и роторно-конических дозаторов [44,91] является наиболее целесообразным в представленных конструкциях нонмиксеров.

При исследовании процесса дозирования сыпучего материала роторным питателем в качестве выходной переменной (функции отклика) была выбрана производительность питателя.

В качестве входных переменных (факторов) выбраны параметры, характеризующие питатель, которые были рассмотрены в предыдущих исследованиях [44,45,117], а именно:  $x_1$  – объем пазов барабана, см<sup>3</sup> и  $x_2$  – окружная скорость барабана, м/с. Остальные факторы и параметры питателя при проведении многофакторного регрессионного анализа считали неизменными.

Для проведения регрессионного анализа был синтезирован план, матрица планирования и результаты реализации которого для трех разных материалов: карбонат кальция  $CaCO_3$  [30], ферротитан [26] и порошок меди [27].

По плану эксперимента выполнен регрессионный анализ на ЭВМ. Значимость полученных коэффициентов уравнений регрессии проверяли по  $t$ -критерию Стьюдента, далее из полученных уравнений удалили все незначимые коэффициенты. Так как принятый план не является ортогональным необходимо было выполнить перерасчет полученных математических моделей. Проверку адекватности моделей проводили по  $F$ -критерию Фишера [18,48,73,103,111].

В результате обработки данных получены следующие математические модели в виде полиномиальных зависимостей производительности роторного

конического питателя –  $Y$ , г/с от варьируемых параметров (объем пазов –  $x_1$  и окружная скорость  $x_2$  в кодированном масштабе):

а) для материала карбонат кальция  $CaCO_3$

$$Y = 98.14 + 20.05x_1 + 41.02x_2 - 8.341x_1^2 - 59.35x_2^2 - 18.41x_1x_2 - 4.562x_2^3 + 15.864x_2^4; \quad (2.1)$$

б) для материала ферротитан

$$Y = 145.08 + 35.25x_1 + 49.875x_2 + 7.562x_1x_2 - 8.96x_1^2 - 89.348x_2 - 18.793x_1x_2^2 + 25.843x_2^4; \quad (2.2)$$

в) для материала медный порошок

$$Y = 115.643 + 25.894x_1 + 31.643x_2 - 10.362x_1^2 - 69.783x_2^2 - 21.003x_1x_2^2 + 12.324x_2^3 + 123.85x_2^4; \quad (2.3)$$

Ниже приведены формулы для перехода от абсолютных величин в относительные и обратно

$$x_1 = (V_{об} - 8.9)/3.1,$$

$$V_{об} = 3.1x_1 + 8.9,$$

$$x_2 = (V_{окр} - 0.523)/0.535,$$

$$V_{окр} = 0.535x_2 + 0.523,$$

где  $V_{об}$  – объем пазов роторного конического питателя, см<sup>3</sup>,  $V_{окр}$  – окружная скорость пазов конуса, м/с.

На основе полученных зависимостей 2.1-2.3 можно давать рекомендации по выбору значений кинематических и геометрических параметров роторного питателя при проектировании технологических процессов дозирования различных материалов.

По результатам моделирования были построены серии зависимостей выходного фактора – производительности питателя от различного сочетания входных параметров, которые показаны на рисунках 2.1-2.3, в виде поверхностей отклика и линий равного уровня. На рисунках (графиках) можно проследить «поведение» производительности роторного конического питателя для различных дозируемых компонентов.

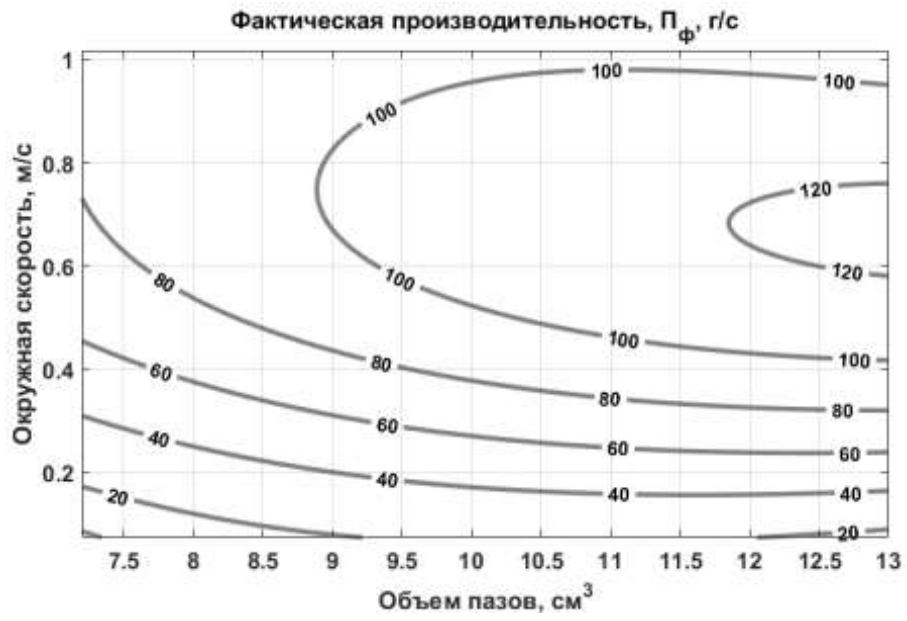


Рисунок 2.1 – Зависимости для материала карбонат кальция  $\text{CaCO}_3$

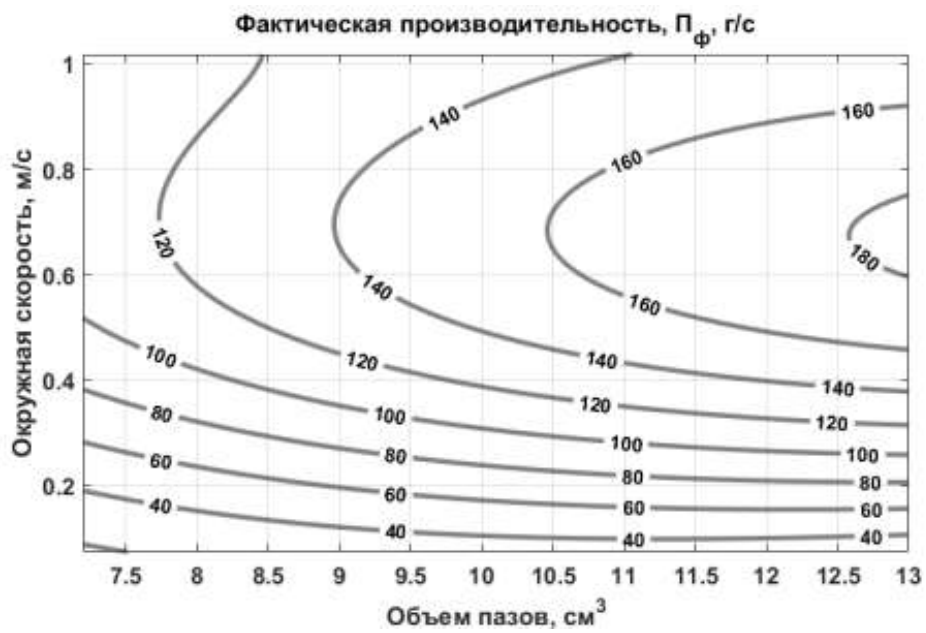


Рисунок 2.2 – Зависимости для материала ферротитан

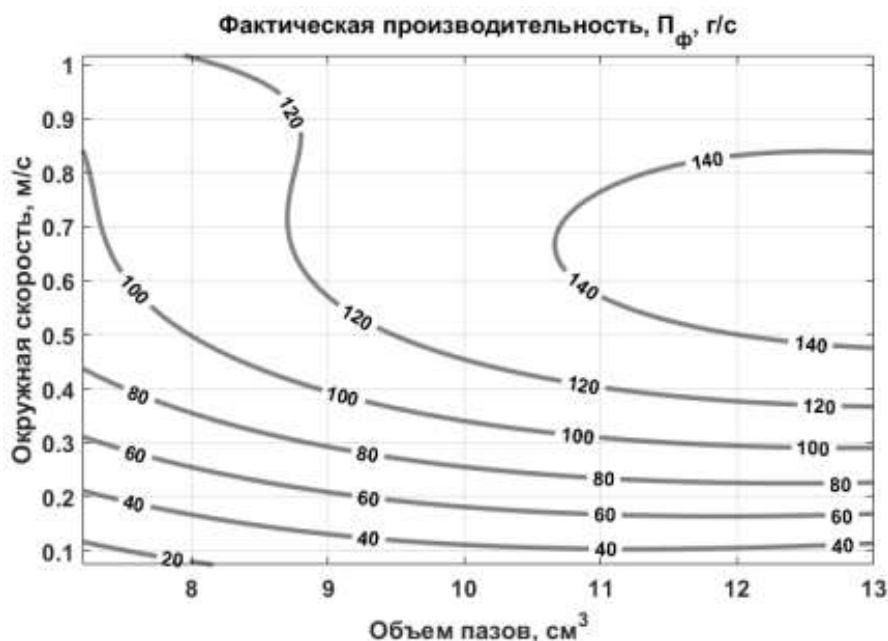


Рисунок 2.3 – Зависимости для материала порошок меди

Результаты расчетов для материала карбонат кальция  $\text{CaCO}_3$  показаны на рисунке 2.1. Согласно графикам, можно сделать вывод, что зависимость фактической производительности питателя от исследуемых факторов имеет нелинейный характер, и при увеличении окружной скорости производительность сначала возрастает, а затем снижается, причем максимум производительности смещается в сторону увеличения объема пазов.

Анализ зависимостей фактической производительности питателя от исследуемых факторов для материала ферротитан и порошок меди, приведенных на рисунках 2.2 и 2.3 соответственно, показал, что для данных условий эксперимента всегда имеется такая окружная скорость барабана, при которой фактическая производительность питателя имеет свое максимальное значение. При постоянном объеме пазов одну и ту же производительность можно получить при разных значениях окружной скорости барабана, то есть при реализации разных кинематических режимов.

Полученные зависимости производительности роторных барабанных питателей от окружной скорости вращения дозирующего барабана и его рабочего объема являются нелинейными.



При проектировании технологического оборудования для дозирования компонентов (смесей), в том числе при их использовании на нонмиксерах можно воспользоваться полученными зависимостями, что позволит по заданной фактической производительности питателя выбрать геометрию всей машины и кинематические параметры процессов дозирования и синтеза смеси. Использование данного вида конических дозаторов целесообразно для любых компоновок нонмиксеров.

### **2.1.2 Регрессионная математическая модель работы роторных дозаторов гетерогенных компонентов для управления качеством смесей, получаемых на нонмиксерах**

В качестве модели были выбраны полиномы, учитывающие взаимодействия факторов: второй степени по первому фактору  $x_1$ , и четвертой степени по второму фактору  $x_2$ .

В результате обработки данных получена следующая модель в виде полиномиальной зависимости производительности роторного конического питателя  $Y$  от варьируемых параметров (объем пазов барабана  $x_1$ , окружная скорость ротора  $x_2$ , остальные параметры питателя считали неизменными)

$$Y = 98,14 + 20,05x_1 + 41,02x_2 - 8,341x_1^2 - 59,35x_2^2 - 18,41x_1x_2^2 - 4,562x_2^3 + 15,864x_2^4, \quad (2.4)$$

По результатам моделирования были построены серии зависимостей выходного фактора – производительности питателя от различного сочетания входных параметров, которые показаны на рисунке 2.4, в виде поверхностей отклика и линий равного уровня.

Согласно графикам, можно сделать вывод, что зависимость производительности питателя от исследуемых параметров имеет нелинейный характер, и при увеличении окружной скорости производительность сначала возрастает, а затем снижается, причем максимум производительности смещается в сторону увеличения объема пазов.

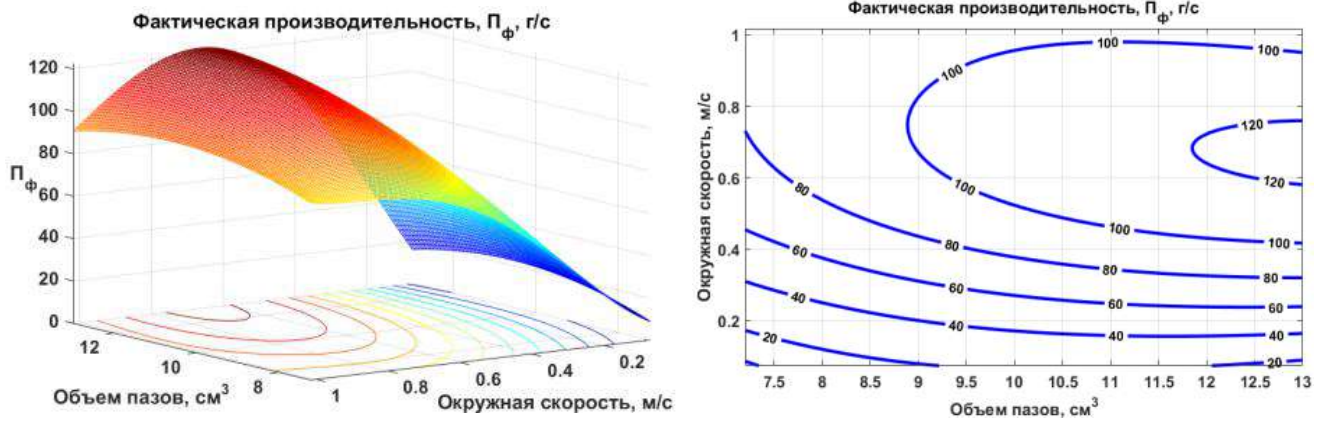


Рисунок 2.4 – Зависимости для материала карбонат кальция  $CaCO_3$

Таким образом, была получена регрессионная зависимость для определения фактической производительности роторного конического питателя. Для исследуемого материала оптимальными, обуславливающими высокую производительность питателя, являются следующие интервалы: объем пазов барабана в пределах  $11-18 \text{ см}^3$ , окружная скорость –  $0,5-0,8 \text{ м/с}$ . Использование дозатора данного типа целесообразно как для линейных, конвейерных, так и для роторных компоновок нонмиксеров [117].

Установлено, что зависимости производительности данных питателей от окружной скорости вращения дозирующего барабана и его рабочего объема являются нелинейными. Полученные зависимости могут быть использованы для определения кинематических параметров процессов дозирования и получения смеси по заданной производительности питателя.

Имея математическую оценку работы питателя по производительности, можно с высокой вероятностью определять и управлять качеством получаемой смесевой и композитной продукции при использовании данных дозирующих устройств в нонмиксерах. Полученные эмпирические и статистические данные позволяют разрабатывать регрессионные математические модели с высоким уровнем сходимости и аппроксимировать их на реальные производственные процессы. Использование полученных данных для некоторых новых критериев

оценки и формирования качества конечной продукции позволяет обеспечивать высокую эффективность технологического процесса в целом.

## 2.2 Математическая модель процесса формирования однородности смесей и композитов из дискретных потоков

Изложена методика замены (оптимизации) длинного ряда распределения дискретной случайной величины, возникающего в процессе расчетов, новыми, вдвое укороченными рядами, с сохранением первых трех начальных моментов исходной случайной величины, что позволяет во всех случаях довести вычисления до конца, значительно сократив при этом время вычислений.

За основу представленной научно-технической разработки взято экспериментальное исследование получения высококачественных штучных смесей компонентов на конвейерном нонмиксере (в традиционном понимании – смесителе), изложенное в работах [93,117,126,142]. Конвейерный нонмиксер [93], состоящий из транспортирующего узла, роторно-шлюзовых дозаторов с поштучной выдачей частиц компонентов составляет упорядоченную композицию.

Изучим работу отдельно выбранного дозатора. За единицу времени  $T$  он выдает на конвейер  $\xi$  частиц какого-то компонента смеси, где  $\xi$  – дискретная целочисленная случайная величина с конечным рядом распределения (полученным после статистической обработки результатов наблюдений), представленным в таблице 2.1. При разработке и оптимизации представленной модели был использован разный математический инструментарий [109-111,139,144].

Таблица 2.1

$\xi$	$x_1$		...	$x_j$	...	$x_n$
$p$	$p_1$		...	$p_j$	...	$p_n$

Здесь, в первой строке записаны значения случайной величины  $\xi$  в порядке ее возрастания, во второй строке – соответствующие им вероятности.

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1. \quad (2.5)$$

Значение  $x_j$  – число частиц, выдаваемое дозатором за единицу времени  $T$ , называется дозой.

Пусть  $\xi = n_1$  – число частиц, выданных дозатором в первом промежутке времени  $0 \leq t < T$  с начала его работы,  $\xi = n_2$  – число частиц за второй промежуток времени  $T \leq t < 2T$  и т.д. Тогда

$\eta_1 = n_1$  – одна случайная доза компоненты в смеси,

$\eta_2 = n_1 + n_2$  – две случайных дозы компоненты в смеси,

$\eta_k = n_1 + n_2 + \dots + n_k - k$  – случайных доз компонента в смеси.

Величины  $n_1, n_2, \dots$  считаются независимыми одинаково распределенными случайными величинами.

Из некоторого количества доз составляется порция смеси. Основное требование к порции: она с заданной вероятностью должна удовлетворять требуемому качеству смеси.

Обозначим через  $m, \sigma$  соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение случайной величины  $\xi$ . Рассмотрим среднее арифметическое указанных случайных величин  $\mu_k = n_1 + n_2 + \dots + n_k$ . Согласно теории вероятностей математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение случайной величины  $\mu_k$  равны  $km$  и  $\sqrt{k}\sigma$  соответственно.

Пусть  $\mu_k$  имеет ряд распределения, представленный в таблице 2.2.

Таблица 2.2

$\mu_k$	$z_1$	$\dots$	$z_i$	$\dots$	$z_N$
$p(k)$	$p_1(k)$	$\dots$	$p_i(k)$	$\dots$	$p_N(k)$

В первой строке записаны значения случайной величины  $\mu_k$  в порядке ее возрастания, во второй строке – соответствующие им вероятности.

$$p_1(k) + p_2(k) + \dots + p_N(k) = 1. \quad (2.6)$$

Требуемое минимальное число  $k = k_{min}$  доз компонента смеси – то минимальное число  $k$ , начиная с которого выполняется условие

$$p\left(\left|\frac{\mu_k}{k} - m\right| \leq \delta_\xi\right) \geq p_\xi, \quad (2.7)$$

где  $\delta_\xi, p_\xi$  – заданные числа, определяющие требуемые вероятностные характеристики качества содержания выбранного компонента в смеси.

После нахождения числа  $k_{min}$  для каждого компонента смеси окончательное число доз в порции смеси равно максимальному из чисел  $k_{min}$ , найденных для всех компонентов смеси.

Когда число  $N$  значений случайной величины  $\mu_k$  становится большим, получение ряда случайной величины  $\mu_{k+1}$ , и вычисление для этого ряда числа  $k_{min}$  становится проблематичным по указанной выше причине. Ниже предлагается алгоритм решения поставленной задачи, основанный на замене длинного ряда распределения случайной величины  $\mu_k$  более коротким рядом распределения новой случайной величины, которая по вероятностным характеристикам близка к случайной величине  $\mu_k$ .

Приведем подробно алгоритм «укорочения» ряда распределения случайной величины  $\mu_k$  с большим числом  $N$ . Для этого заменим ряд указанной случайной величины значений рядом распределения (таблица 2.3).

Таблица 2.3

$\vartheta_k$	$y_1$	$\dots$	$y_i$	$\dots$	$y_L$
$q$	$q_1$	$\dots$	$q_i$	$\dots$	$q_L$

Новая случайная величина  $\vartheta_k$  принимает значения  $y_i$  с вероятностью  $q_i$ . Этот ряд получим из ряда случайной величины  $\mu_k$  следующим образом.

1) Разобьем  $N$  значений ряда случайной величины  $\mu_k$  вместе с их вероятностями на последовательные «четверки» (таблица 2.4).

Таблица 2.4

$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$	$z_7$	$z_8$	$z_9$	$z_{10}$	$z_{11}$	$z_{12}$	...
$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	$p_7$	$p_8$	$p_9$	$p_{10}$	$p_{11}$	$p_{12}$	...

Последнее разбиение может содержать менее четырех значений.

2) Полученные четверки заменяем «парами» значений ряда случайной величины  $\vartheta_k$  (таблица 2.5).

Таблица 2.5

$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	...
$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	...

3) На примере первой «четверки» приведем формулы получения значений  $y_1, y_2, q_1, q_2$  первой «пары».

Указанные значения – решение следующей системы уравнений

$$\begin{cases} q_1 + q_2 = a_0 = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 \\ y_1 q_1 + y_2 q_2 = a_1 = x_1 p_1 + x_2 p_2 + x_3 p_3 + x_4 p_4 \\ y_1^2 q_1 + y_2^2 q_2 = a_2 = x_1^2 p_1 + x_2^2 p_2 + x_3^2 p_3 + x_4^2 p_4 \\ y_1^3 q_1 + y_2^3 q_2 = a_3 = x_1^3 p_1 + x_2^3 p_2 + x_3^3 p_3 + x_4^3 p_4 \end{cases} \quad (2.8)$$

Сначала из первых двух уравнений находим следующие выражения для вероятностей  $q_1, q_2$ .

$$q_1 = \frac{a_0 y_2 - a_1}{y_2 - y_1}, q_2 = \frac{a_1 - a_0 y_1}{y_2 - y_1}, \quad (2.9)$$

подставляя которые в два последних уравнения системы, получим систему

$$\begin{cases} y_1 + y_2 = \frac{-a_1 a_2 + a_0 a_3}{-a_1^2 + a_0 a_2} = b \\ y_1 y_2 = \frac{a_1 a_3 - a_2^2}{-a_1^2 + a_0 a_2} = c \end{cases}, \quad (2.10)$$

из которой следует, что

$$y_1 = \frac{c}{2} - \sqrt{\frac{c^2}{4} - b}, y_2 = \frac{c}{2} + \sqrt{\frac{c^2}{4} - b}. \quad (2.11)$$

Если обозначить  $a_{ij} = p_i p_j (x_j - x_i)^2$ , где  $i = 1, 2, 3, 4, j = 2, 3, 4$  и  $j > i$ , то непосредственными вычислениями выводится, что

$$y_1 = \frac{\sum a_{ij} x_i}{\sum a_{ij}}, \quad y_2 = \frac{\sum a_{ij} x_j}{\sum a_{ij}}, \quad (2.12)$$

где под знаком  $\sum$  производится суммирование по значениям  $i, j$ , приведенным выше.

Отсюда, с учетом того, что  $0 = x_1 < x_2 < x_3 < \dots$  находятся границы интервалов, в которых лежат величины  $y_1, y_2$

$$x_1 < y_1 < x_3, \quad x_2 < y_2 < x_4. \quad (2.13)$$

Кроме этого, из формул (8) следует, что  $y_1 < y_2$ .

После подстановки найденных значений в формулы 2.9 однозначно определяются величины  $q_1, q_2$ . Опуская явные громоздкие выражения величин  $q_1, q_2$  через  $x_1, x_2, x_3, x_4, p_1, p_2, p_3, p_4$ , отметим только, что из этих выражений вытекает, что  $0 < q_1 < q_2$ .

Аналогичным образом вторая «четверка» преобразуется во вторую «пару» и т.д. (таблица 2.6-2.7).

Таблица 2.6

$z_5$	$z_6$	$z_7$	$z_8$
$p_5$	$p_6$	$p_7$	$p_8$

Таблица 2.7

$y_3$	$y_4$
$q_3$	$q_4$

Если  $N$  делится нацело на 4, то последняя «четверка» преобразуется в последнюю «пару». Если же  $N$  делится на 4 с остатком  $1 \leq r \leq 3$ , то остаток ряда распределения случайной величины  $\mu_k$  присоединяется к последней «четверке», и все вместе преобразуются в последнюю «пару» ряда распределения случайной величины  $\vartheta_k$  с использованием тех же формул, что и выше, в которых теперь

$$a_0 = \sum_{i=N-3-r}^N p_i, a_1 = \sum_{i=N-3-r}^N x_i p_i, a_2 = \sum_{i=N-3-r}^N x_i^2 p_i, a_3 = \sum_{i=N-3-r}^N x_i^3 p_i. \quad (2.14)$$

Полученный таким образом новый ряд распределения (случайная величина  $\vartheta_k$ ) вдвое меньше ряда заменяемой случайной величиной  $\mu_k$ . При этом случайная величина  $\vartheta_k$  имеет те же три первые начальные момента, что и случайная величина  $\mu_k$ , т.к.

$$\sum_{i=1}^N x_i p_i = \sum_{i=1}^L y_i q_i, \sum_{i=1}^N x_i^2 p_i = \sum_{i=1}^L y_i^2 q_i, \sum_{i=1}^N x_i^3 p_i = \sum_{i=1}^L y_i^3 q_i. \quad (2.15)$$

Последующим суммированием случайных величин  $\vartheta_k$  и  $\xi$  получаем ряд распределения случайной величины  $\tilde{\mu}_{k+1}$ , которая по вероятностным характеристикам близка к недоступным прямым вычислениям случайной величине  $\mu_{k+1}$ . Суммируя далее  $\tilde{\mu}_{k+1}$  с  $\xi$ , получаем случайную величину  $\tilde{\mu}_{k+2}$  и т.д.

При необходимости, проводится укорочение ряда распределения случайной величины  $\tilde{\mu}_{k+n}$ , у которой количество ее значений превышает допустимый предел для продолжения суммирования этой случайной величины со случайной величиной  $\xi$ . И т.д., пока вычисления не приведут к нахождению искомого числа  $k_{min}$ .

Указанным образом можно проводить укорочение ряда случайной величины  $\mu_k$  втрое (таблица 2.8-2.9). Для этого надо ряд этой случайной величины разбить на последовательные «шестерки» и преобразовать их в последовательные «пары» по тем же формулам 2.9, 2.12.

Таблица 2.8

$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$	$z_7$	$z_8$	$z_9$	$z_{10}$	$z_{11}$	$z_{12}$	...
$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	$p_7$	$p_8$	$p_9$	$p_{10}$	$p_{11}$	$p_{12}$	...

Таблица 2.9

$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	...
-------	-------	-------	-------	-----



$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$\dots$
-------	-------	-------	-------	---------

Только теперь для преобразования первой «шестерки» в первую «пару» надо взять

$$a_0 = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6, \quad (2.16)$$

$$a_1 = x_1 p_1 + x_2 p_2 + x_3 p_3 + x_4 p_4 + x_5 p_5 + x_6 p_6, \quad (2.17)$$

$$a_2 = x_1^2 p_1 + x_2^2 p_2 + x_3^2 p_3 + x_4^2 p_4 + x_5^2 p_5 + x_6^2 p_6, \quad (2.18)$$

$$a_3 = x_1^3 p_1 + x_2^3 p_2 + x_3^3 p_3 + x_4^3 p_4 + x_5^3 p_5 + x_6^3 p_6. \quad (2.19)$$

Аналогично, вторая «шестерка» преобразуется во вторую «пару» и т.д. В результате получим втрое меньший по длине ряд распределения новой случайной величины  $\zeta_k$ .

Таблица 2.10

$\zeta_k$	$y_1$	$\dots$	$y_i$	$\dots$	$y_J$
$q$	$q_1$	$\dots$	$q_i$	$\dots$	$q_J$

При этом случайная величина  $\zeta_k$  имеет те же три первые начальные момента, что и случайная величина  $\mu_k$ , т.к.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N x_i p_i &= \sum_{i=1}^J y_i q_i, \quad \sum_{i=1}^N x_i^2 p_i = \sum_{i=1}^J y_i^2 q_i, \\ \sum_{i=1}^N x_i^3 p_i &= \sum_{i=1}^J y_i^3 q_i. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Точно так же можно разбить ряд распределения случайной величины  $\mu_k$  на последовательные «пятерки» и преобразовать их в последовательные «пары» новой случайной величины  $\rho_k$ , которая будет иметь число значений меньшее, чем у случайной величины  $\vartheta_k$  и большее, чем число значений у случайной величины  $\zeta_k$ .

Таким образом, осуществляется логическая оптимизация математической модели и процессов ее вычислительной обработки, что позволяет обеспечить высокую сходимость результатов моделирования процесса конвейерного нонмиксинга, полученных с помощью разработанного и представленного

алгоритма с полученными при реальном исследовании нового устройства данными [93].

## **2.3 Математическое моделирование процессов формирования однородности из непрерывных потоков**

### **2.3.1 Математическая модель процессов формирования однородности смесей и композитов из непрерывных потоков на основе аппарата теории вероятностей**

При анализе процесса приготовления смесей [10,43,60,70,77,90,97,149-152] используют следующие технические понятия: гетерогенная смесь, компоненты смеси, содержание компонента (в процентах – по объему или весу), допуск  $\delta$  на содержание компонента ( $\pm$  в процентах – по объему или по весу), доза компонента, нонмиксеры.

Предлагаемый метод (способ) создания смеси – параллельно-последовательная раскладка доз компонентов при формировании потока или партии продукции (смеси).

Методы (способы) создания доз:

- до раскладки в смесь: объемное или весовое отделение доз в мерники;
- в процессе раскладки смеси: отделение доз отсекателями по времени.

Рассматривается взаимодействие дозаторов и емкостей для готовой смеси в процессе раскладки отделяемых микродоз компонентов следующими вариантами:

- перемещение дозаторов относительно неподвижной партии смеси;
- перемещение потока смеси относительно неподвижных дозаторов (с остановкой или без остановки потока);
- перемещение дозаторов вместе с потоком или относительно потока.

Сформирована модель о статистических характеристиках показателей качества смеси при дозировании по времени с помощью отсекателей компонентов [90], выдаваемых некоторым количеством дозаторов.

Содержание компонента

$$S_i = \frac{V_i}{V}, \quad (2.21)$$

где  $V_i$  – объем или масса единичной дозы компонента, выдаваемой одним из дозаторов в единицу времени. Эта величина имеет статистические характеристики математического ожидания и дисперсию:  $\bar{V}_i$  и  $D_{vi}$  соответственно.

В смеси на содержание каждого из компонентов влияет разброс (дисперсия) других компонентов.

При независимости подачи компонента отдельным дозатором (и независимости статистических характеристик дозируемого объема) дисперсии могут складываться, причем размерность дисперсии при сложении должна быть пропорциональна математическим ожиданиям, т.е. дозируемому весу или объему [10,60].

Общая дисперсия объема или веса смеси составит

$$D^2 = \frac{V_1}{V} D_{v1}^2 + \frac{V_2}{V} D_{v2}^2 + \dots + \frac{V_i}{V} D_{vi}^2 + \dots + \frac{V_n}{V} D_{vn}^2. \quad (2.22)$$

При этом отношение объемов (весов) можно представить как содержание компонента, т.е.

$$D^2 = S_1 D_{v1}^2 + S_2 D_{v2}^2 + \dots + S_i D_{vi}^2 + \dots + S_n D_{vn}^2. \quad (2.23)$$

Общая дисперсия распространяется на каждый из компонентов.

Коэффициент точности дозирования компонентов определится как

$$K_{vi} = \frac{t_\alpha \sqrt{D^2}}{\delta_{vi} V_i} < 1, \quad (2.24)$$

где  $t_\alpha$  – квантиль распределения доверительной вероятности  $\alpha$  получения данной точности.

На основе вышеизложенных способов формирования показателей качества смесей, получаемых из различных компонентов, представлены две возможные компоновки нонмиксеров с разными пространственными комбинациями дозаторов (рисунки 2.5-2.6). На них показаны дозаторы Д1-Д3, которые выдают микродозы компонентов в емкости Е1-Е7, в которых в свою очередь формируется готовая смесь.

Общий принцип формирования однородности и соответственно качества получаемых смесей для обоих компоновок состоит в следующем.

Способ смешивания нескольких компонентов в одну смесь, заключающийся в том, что из  $n$  последовательно расположенных (с определенным шагом – для варианта 2) дозаторов поступают дозы компонентов в емкость, установленные  $m$  последовательно расположенных (с определенным шагом – для варианта 2) транспортных позициях, причем необходимые для наполнения емкостей объемы смесей получают за несколько циклов наполнения емкостей из дозаторов, отличающиеся тем, что для:

- варианта 1 (рисунок 2.5) – цикл включает наполнение  $n$  емкостей, расположенных последовательно в транспортных позициях, причем число  $n$  последовательно расположенных дозаторов и число  $m$  последовательно расположенных транспортных позиций, которые являются взаимно простыми числами;
- варианта 2 (рисунок 2.6) – транспортные позиции расположены по замкнутому контуру, перед каждым циклом наполнения транспортные позиции с емкостями смещают относительно дозаторов на некоторое количество  $n$  последовательно расположенных дозаторов и некоторое число  $m$  последовательно расположенных транспортных позиций, которые являются взаимно простыми числами.

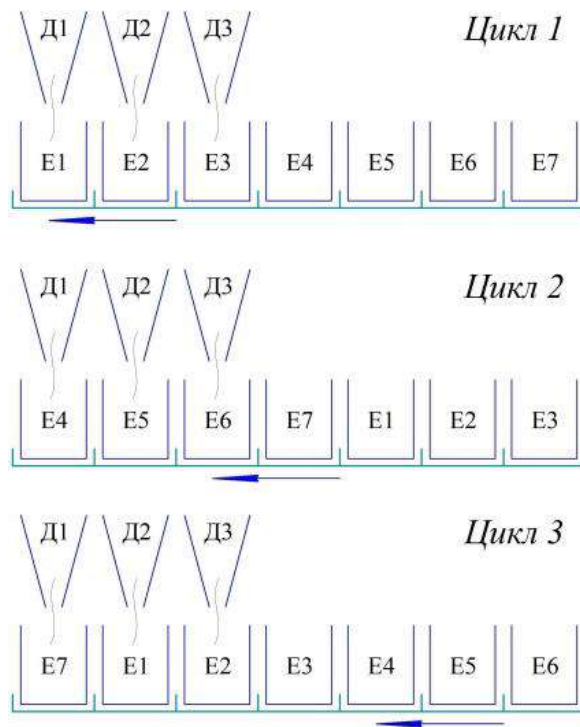


Рисунок 2.5 – Линейная компоновка нонмиксера

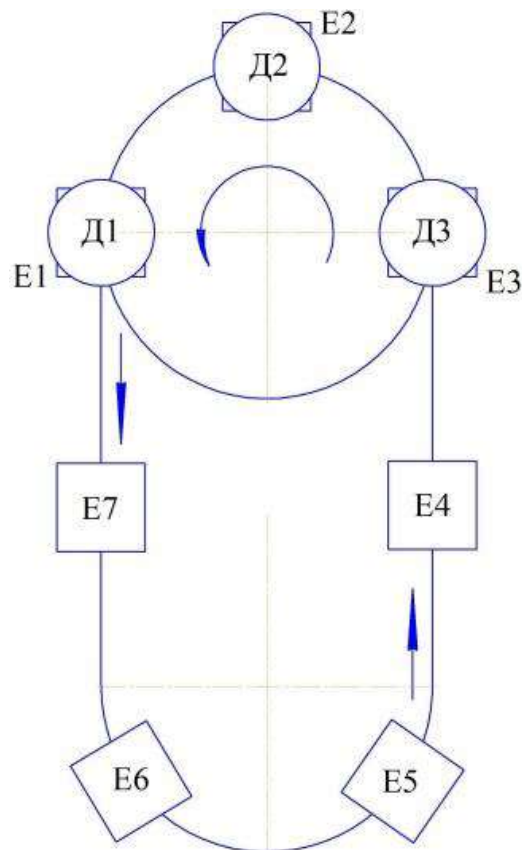


Рисунок 2.6 – Роторно-конвейерная компоновка нонмиксера

На основе проведенного анализа [43,77,90], можно сделать вывод о том, что второй вариант компоновки имеет следующие преимущества перед первым вариантом:

- наполнение емкости для смеси за несколько циклов дает возможность минимизировать дозу;
- конструкция обеспечивает минимальное единичное и целое число дозаторов для каждого компонента;
- параллельно-последовательная работа дозаторов дает возможность увеличить производительность нонмиксера в целом.

Однако первый вариант значительно проще в изготовлении, эксплуатации и обслуживании, а, следовательно, и дешевле, что немаловажно при выборе устройства для конкретного производства.

Также следует отметить, что по сравнению с более ранними техническими решениями [77,90], в данных компоновках нонмиксеров возможно формирование упорядоченной структуры смеси во много раз более разнообразными вариантами комбинирования микродоз компонентов, число которых можно определить по формуле

$$C_n^m = \frac{n}{m(n-m)!} \quad (2.25)$$

что актуально при производстве некоторых видов гетерогенных смесей для различных типов потребления.

### **2.3.2 Математическая модель процессов формирования однородности смесей и композитов однородности из непрерывных потоков на основе методов математического анализа**

В полезный объем (транспортную ленту, ротор, бункер и т.п.), а затем в накопитель поступают несколько непрерывных потоков компонентов смеси или композита, измеряемых в единицах объема.  $V = V(t)$ , где  $t$  – это время. Весь

объем смеси или композиции получают за промежуток времени  $0 \leq t \leq T$ .

Рассмотрим какой-нибудь один компонент композиции. График производной  $\dot{V}(t)$  по времени от объема  $V(t)$  (рисунок 2.7) представляет случайную апериодическую функцию.

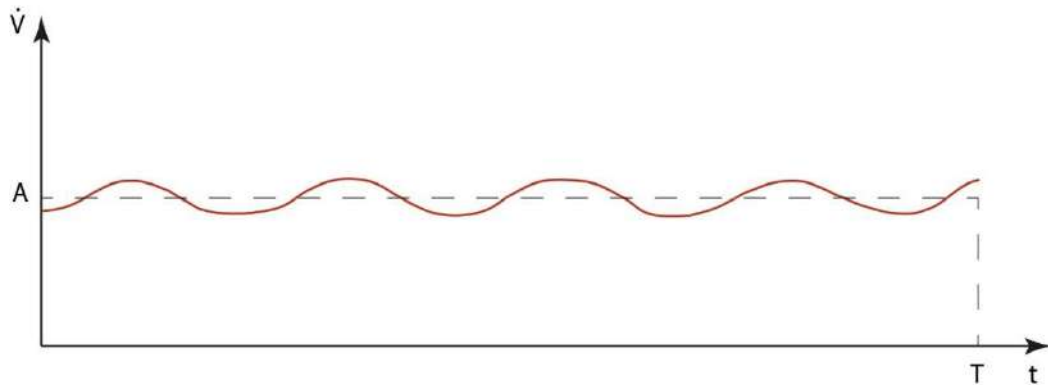


Рисунок 2.7 – График функции  $\dot{V}(t)$

Функция  $\dot{V}(t)$  колеблется около среднего значения  $A$ .

$$A = \frac{V(t)}{T},$$

$$V(t) = \int_0^T \dot{V}(t) dt.$$

В идеальном случае  $A = A_*$ . В реальном же

$$|A - A_*| \leq \alpha,$$

где  $\alpha$  – максимально возможное отклонение  $A$  от  $A_*$ .

Запишем функцию  $\dot{V}(t)$  в виде интеграла Фурье.

$$\dot{V}(t) = A + \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} a(\omega) \sin(\omega t + b(\omega)) d\omega.$$

где  $a(\omega)$ ,  $b(\omega)$  – случайные функции,  $a(\omega)$  – амплитуда,  $b(\omega)$  – фаза колебаний, отвечающих частоте  $\omega$ .

$$\omega_{min} \leq \omega \leq \omega_{max},$$

$$0 \leq a(\omega) \leq a_{max} = \max[\omega_{min}; \omega_{max}] a(\omega),$$

$$0 \leq b(\omega) < 2\pi.$$

Верхняя частота  $\omega_{max}$  ограничена из-за возможности высокочастотных колебаний при выдаче объема компонента. Нижняя частота  $\omega_{min}$  также ограничена. Низкие частоты из-за конечности времени  $T$  вносят вклад в величину  $A$  и не включаются в колебательный характер изменения функции  $\dot{V}(t)$ .

Далее считаем частоты  $\omega_{min}$ ,  $\omega_{max}$  незначительно отличающимися друг от друга.

Величины  $\alpha$ ,  $\omega_{max}$ ,  $\omega_{min}$ ,  $a_{max}$  определяются опытным путем с помощью соответствующих экспериментов.

Выясним, когда при заданном значении  $T$  объем  $V(T)$  отличается от требуемого значения  $A_*T$  не более, чем на заданную величину  $\Delta$ .

$$|V(T) - A_*T| \leq \Delta. \quad (2.26)$$

Поскольку

$$\begin{aligned} V(T) &= \int_0^T \left\{ A + \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} a(\omega) \sin(\omega t + b(\omega)) d\omega \right\} dt = \\ &= AT + \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} a(\omega) \left( \int_0^T \sin(\omega t + b(\omega)) dt \right) d\omega = \\ &= AT + \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} \frac{a(\omega)}{\omega} [\cos b(\omega) - \cos(\omega T + b(\omega))] d\omega = \\ &= AT + 2 \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} \frac{a(\omega)}{\omega} \sin \frac{\omega T}{2} \sin \left( \frac{\omega T}{2} + b(\omega) \right) d\omega. \end{aligned}$$

Получаем

$$\begin{aligned} |V(T) - A_*T| &= \left| (A - A_*)T + 2 \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} \frac{a(\omega)}{\omega} \sin \frac{\omega T}{2} \sin \left( \frac{\omega T}{2} + b(\omega) \right) d\omega \right| \leq \\ &\leq |(A - A_*)|T + 2 \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} \frac{a(\omega)}{\omega} \left| \sin \frac{\omega T}{2} \right| \left| \sin \left( \frac{\omega T}{2} + b(\omega) \right) \right| d\omega \leq \\ &\leq \alpha T + 2 \frac{a_{max}}{\omega_{min}} (\omega_{max} - \omega_{min}). \end{aligned}$$

И, неравенство (2.26) выполняется, если

$$\alpha T + 2 \frac{a_{max}}{\omega_{min}} (\omega_{max} - \omega_{min}) \leq \Delta$$



или при некотором значении постоянной  $0 < k < 1$  выполняется следующая система неравенств

$$\begin{cases} \alpha T \leq k\Delta \\ 2 \frac{a_{max}}{\omega_{min}} (\omega_{max} - \omega_{min}) \leq (1 - k)\Delta \end{cases} \quad (2.27)$$

Если конструктивно удастся добиваться выдачи объема  $V(T)$  компонента, обеспечивающего выполнение этих неравенств, то точность  $\Delta$  поступления компонента в смесь за время  $T$  будет достигнута. При невыполнении неравенств (2.27) можно рассмотреть возможность их выполнения за меньшее время.

Аналогичные оценки и выводы при соответствующих значениях величин  $\Delta$ ,  $\alpha$ ,  $a_{max}$ ,  $\omega_{max}$ ,  $\omega_{min}$ ,  $k$  применимы к другим компонентам изготавливаемой смеси.

## 2.4 Выводы по главе

Полученные математические зависимости, экстраполированные в инженерно-технические методы контроля и управления качеством продукции в условиях реального производства, с учетом специфики используемых компонентов, оборудования и технологий, позволяют обеспечивать получение высококачественных гетерогенных смесей и композиционных материалов.

Представленные методы формирования доз из дискретных и непрерывных потоков компонентов, выдаваемых различными дозирующими устройствами, оптимизация способов получения нужного количества и объема доз компонентов, обеспечивает гарантированное содержание ключевого компонента, в выборке гетерогенной композиции, которую они составляют.

Решение теоретических и научно-практических задач по оптимизации получения наиболее высокого качества гетерогенных композиций, в зависимости от нескольких основных критериев, включая принципы управляемого формирования потоков составляющих компонентов, реализовано в виде разработанной программы для ЭВМ [99].

### **3 ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ГЕТЕРОГЕННЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЯЕМОЙ ОДНОРОДНОСТИ**

В данной главе представлены разработанные критерии оценки качества смесей с возможностью управления однородностью синтезируемых на нонмиксерах гетерогенных композиций. Критерии взаимосвязаны с математическими моделями (2 глава) по параметрам гарантированных показателей качества композиций и техническими характеристиками дозирующих устройств и нонмиксеров, но выделены в отдельное математическое обоснование, так как имеют прежде всего инженерное применение и наиболее близки к реализации частных производственных задач.

#### **3.1 Обоснование однородности как основного показателя качества гетерогенных композиций**

Одним из способов оценки качества смеси является метод определения степени однородности. Если он не направлен на исследование самого смешения, то заключается в сопоставлении его наблюдаемого итога с пределом мыслимых возможностей.

Если  $a, b, c, \dots$  физические величины, характеризующие принадлежность частиц к различным фракциям, то, в идеале, с понятием «однородность» ассоциируют взаимное равенство их значений  $a_i, b_i, c_i, \dots$  во всех  $N$  одинаковых элементарных объемах, на которые возможно мысленно разобщить смесь

$$\{a_1, b_1, c_1, \dots\} = \{a_2, b_2, c_2, \dots\} = \dots = \{a_i, b_i, c_i, \dots\} = \dots = \{a_N, b_N, c_N, \dots\}. \quad (3.1)$$

Понятно, что суммы

$$\sum_{i=1}^N a_i = A; \quad \sum_{i=1}^N b_i = B; \quad \sum_{i=1}^N c_i = C; \quad \dots \quad (3.2)$$

являются количествами соответствующих физических величин веществ в изначально разделенных фракциях. В связи с этим равенства (3.1) часто представляют в виде пропорций

$$a_i \sim A; \quad b_i \sim B; \quad c_i \sim C; \quad \dots, \quad i = 1 \dots N, \quad (3.3)$$

или всевозможных их комбинаций

$$\frac{a_1}{b_1} = \dots = \frac{a_i}{b_i} = \dots = \frac{A}{B}; \quad \frac{b_1}{c_1} = \dots = \frac{b_i}{c_i} = \dots = \frac{B}{C}; \quad \dots; \quad i = 1 \dots N. \quad (3.4)$$

Значит однородность, это такое качество смеси, которое возможно определить степенью соответствия конечной композиции частиц строгости выражений (3.4)

$$\forall i \in [1 \dots N]: \quad \left| \frac{A}{B} - \frac{a_i}{b_i} \right| \leq \varepsilon; \quad \left| \frac{B}{C} - \frac{b_i}{c_i} \right| \leq \varepsilon; \quad \dots, \quad (3.5)$$

где  $\varepsilon$  – заданный его показатель.

Тогда, на практике, оценку (3.5) представляют результатом  $n$  действий. Каждое,  $i$ -ое из которых образует процедуру: из смеси извлекают пробу с объемом, равным элементарному; производят измерения значений величин  $\{a_i, b_i, c_i, \dots\}$ ; и, собственно, проверяют соответствие результата указанным неравенствам. Очевидно, что достоверность данного анализа обратно пропорциональна размеру извлекаемых проб, а его результаты тем более объективны, чем выполнено большее количество изысканий, так что

$$n = N; \quad N \rightarrow \infty. \quad (3.6)$$

Эмпирические исследования в смысле (3.6) возможны, их осуществляют на «микроскопическом» уровне, том, когда отношения размеров частиц компонентов близки к размеру пробы.

Число подобных наблюдений, позволяющее получить приемлемые для анализа результаты, должно превышать 2.000 [68]. Вероятно, эта цифра говорит о продолжительном и трудоемком эксперименте. Тем не менее, современные инструменты и вычислительные устройства дают возможность превысить ее на несколько порядков.

Например, в публикации [42], с помощью электронного микроскопа и алгоритмов обработки больших данных, авторы смогли оценить линейные

размеры 3.524.500 частиц. Так же интересны лазерные гранулометрические детекторы с динамическим анализом изображений. Они позволяют определять размеры частиц в диапазоне от 0,1 мкм до 3.000 мкм при объеме исследуемой пробы около 0,3 дм<sup>3</sup>. Хотя эти параметры и накладывают ограничения на область применения приборов, но не умоляют их скорости — свыше 250 кадров в секунду [8]. При этом точность анализаторов такова, что делает возможным фиксировать частицы, с размером составляющим 0,01% от размера пробы.

Все же имея цель оптимизировать процесс оценки качества, исследователи прибегают к косвенным способам измерений. Например, насыщенность смеси диэлектрических корпускул металлическими логично характеризовать не сложно определенной количественной пропорцией, а степенью реакции пробы на заданное магнитное поле [47]. Ровно как качество смеси черного и белого пигмента не редко оценивают критериями изменчивости оптической плотности [88,100,113].

На подобном, «макроскопическом» уровне, число принятых для исследования физических величин уменьшают, моделируя смесь, вне зависимости от числа составляющих, композицией содержащей только ключевой и условный компоненты. Частицы, признак принадлежности которых к одной из исходных фракций вполне легко анализируем, именуем ключевым компонентом, а термином «условный» обобщают все оставшиеся [71,98].

Сведенные таким образом к определению только двух параметров  $a_i$  и  $b_i$  изыскания еще более упрощают. Для этого вводят понятие концентрации или отношения значения величины ключевого компонента в пробе к некоторому ее количественному признаку в целом. Например, соотносят значения  $a_i$  с известным элементарным объемом  $v_i$

$$c_i = \frac{a_i}{v_i}; \quad v_i = v_{i+1} = \dots = \frac{v_0}{N}. \quad (3.7)$$

При совпадении размерностей числителя и знаменателя в соотношении (3.7), концентрацию именуем объемной долей ключевого компонента [11,42,51]. На тех же основаниях вводят и понятие массовой доли, например в публикациях [5,49,72].

Итак, по определению (3.7) условие однородности (3.1) преобразуется в выражение

$$\forall i \in [1 \dots N]: c_1 = c_2 = \dots = c_i = \dots = c_N, \quad (3.8)$$

а оценка (3.5) сводится к однопараметрическому виду

$$\forall i \in [1 \dots N]: |\bar{c}_{(N)} - c_i| \leq \varepsilon, \quad (3.9)$$

где

$$\bar{c}_{(N)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i,$$

представляет собой среднее арифметическое значение концентрации ключевого компонента во всей смеси.

Заметим, что здесь и далее стоящая в скобках литера, указывает число элементарных объемов, на основании которых определена та или иная величина.

В силу (3.1), (3.2), (3.7) и (3.8)

$$\bar{c}_{(N)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i = \frac{1}{N \cdot v_i} \sum_{i=1}^N a_i = \frac{A}{v_0}. \quad (3.10)$$

Отметим, что в практике макроскопических исследований, вследствие ненаблюдаемых технологических процессов, фактическое значение  $\bar{c}$  оказывается иным, нежели вычисленное по формуле (3.10) [15], что характеризуют мерой рассеяния (рисунок 3.1)

$$w = \frac{\bar{c}_{(N)}}{\bar{c}_0}; \quad \bar{c}_0 = \frac{A}{v_0}. \quad (3.11)$$

Ход дальнейшего упрощения неравенств (3.5) возможен, пожалуй, только посредством снижения их количества или числа исследуемых элементарных объемов. Он сопряжен как с изучением физического характера смеси, так и с изучением способа отбора и исследования проб. Или же, с представлением природы смешения, определяющей метод эмпирического анализа и вид неравенств (3.9).

Рассмотрим смесительные устройства, в которых процесс смешения имеет стохастическую природу. То есть такую, что взаимное расположение частиц и в каждом элементарном объеме, и во всей смеси, может быть неограниченно разнообразным.

В этом случае наблюдаемая концентрация  $c_i$  ключевого компонента в  $i$ -ой пробе становится величиной, обладающей вероятностью

$$p(c_i) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{f_i}{N}, \quad (3.12)$$

где  $f_i$  — частота или число раз появления значения  $c_i$  в опытах. Тогда в определение понятия однородности (3.8) вкладывают смысл

$$\{p(c_1)\} = \{p(c_2)\} = \dots = \{p(c_i)\} = \dots = \{p(c_N)\}. \quad (3.13)$$

То есть однородной считают смесь, в каждом из воображаемых элементарных объемов которой значения концентрации ключевых компонентов равны по вероятности. И, таким образом, совершенно однородной или идеальной считают детерминированную композицию [19,44,88]

$$\forall i \in [1 \dots N]: p(c_i) = p(\bar{c}_0) = 1, \quad (3.14)$$

Формулу (3.14) изображают точкой на плоскости с координатами  $p$  и  $c$ , а смесь, свойства которой не исключают возможность наличия в пробе любых значений концентрации, статистикой эмпирических данных  $\{p(c_1), \dots, p(c_N)\}$  или, в смысле формализма (3.6), теоретической кривой  $p = p(c)$  — законом распределения вероятности в дифференциальной форме (рисунок 3.1).

В этом представлении, выполнение каждого из неравенств (3.9) определяют вероятностью события

$$p_i(|\bar{c}_{(N)} - c_i| \leq \varepsilon), \quad (3.15)$$

а качество смеси тем, что суммарная или полная вероятность данных наблюдений равна или превышает величину  $\alpha$

$$P_{(N)}(|\bar{c}_{(N)} - c_i| \leq \varepsilon) = \sum_{i=1}^N p_i(|\bar{c}_{(N)} - c_i| \leq \varepsilon) = \int_{\bar{c}_{(N)} - \varepsilon}^{\bar{c}_{(N)} + \varepsilon} p(c) dc \geq \alpha. \quad (3.16)$$

В общем случае, для любых статистик и законов распределения, оценка значения суммы или интеграла в выражении (3.16) дана Чебышевым [19]

$$P_{(N)}(|\bar{c}_{(N)} - c_i| \leq \varepsilon) \geq 1 - \frac{s_{(N)}^2}{\varepsilon^2}. \quad (3.17)$$

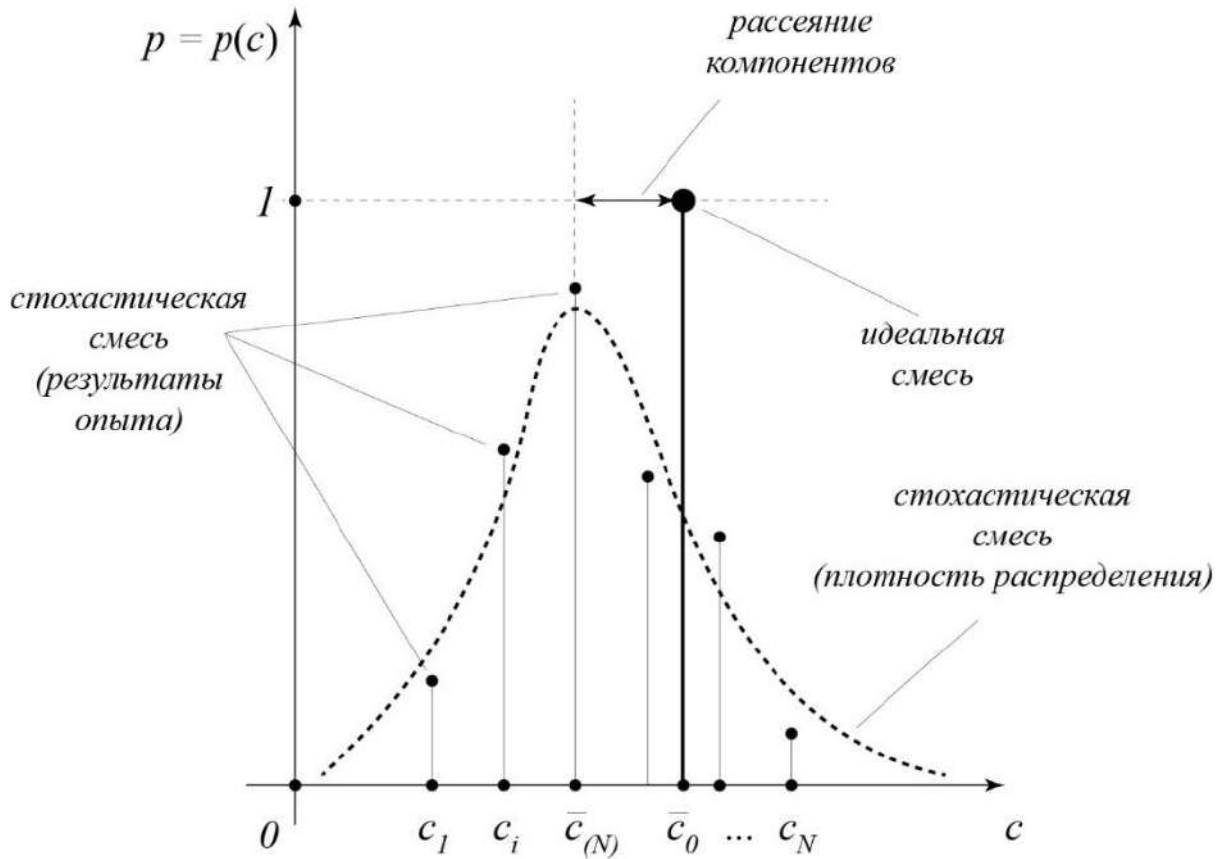


Рисунок 3.1 – Сгруппированная в гистограмму статистика и закон распределения концентрации ключевого компонента в стохастической смеси, а также идеальная композиция. Вследствие рассеяния, значение арифметической средней  $\bar{c}$  смещено относительно  $\bar{c}_0$

Так что, на основании (3.17), в качестве показателя степени однородности используют среднее квадратическое отклонение  $s_{(N)}$

$$s_{(N)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^m f_i (\bar{c}_{(N)} - c_i)^2}, \quad \bar{c}_{(N)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m c_i f_i, \quad N = \sum_{i=1}^N f_i, \quad (3.18)$$

где  $m$  — число отдельных значений  $c_i$  в наблюдениях.

Заметим, формула (3.18), содержащая концентрацию в смысле выражения (7), обладает размерностью, что делает сложными сравнительные оценки. С целью устранения этого недостатка показатель  $s$  нормируют, получая коэффициент вариации

$$V = \frac{s}{\|s\|} \cdot 100 \quad (\%). \quad (3.19)$$

Придав величине  $\|s\|$  в выражении (3.19) смысл среднего значения  $\bar{c}_{(N)}$ , из (3.19) и (3.18) получают соотношение, известное как коэффициент неоднородности концентрации

$$V_{(N)} = \frac{1}{\bar{c}_{(N)}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^m f_i (\bar{c}_{(N)} - c_i)^2} \cdot 100 \quad (\%). \quad (3.20)$$

Напомним, что аналитическая простота формул (3.17)-(3.20) не исключает практической трудоемкости, вытекающей из необходимости проведения большого количества измерений. В результате авторы приходят к выборочным методам, позволяющим по значениям  $s_{(n)}, V_{(n)}$  известным из небольшого числа опытов  $n$ , характеризовать генеральные величины  $s_{(N)}, V_{(N)}$ . Все они требуют знания закона распределения, который, в большинстве исследований, считают нормальным, задают априори: при малой выборке — формулой Стьюдента, а при средней — функцией Гаусса [103]. При этом, за малую принимают выборку с  $n \leq 25$ , а за среднюю порядка 100...250 элементарных объемов [68,104].

В [71] приведены выводы графического анализа репрезентативности числа проб. Смесь представлена в виде 5000 черных частиц, нормально распределенных в 600 клетках белой статистической решетки. В следствии отбора 20 проб, состоящих из 100 разноцветных частиц каждая, расположенных вокруг точек, выбранных по таблице того же распределения, установлено следующее соотношение теоретического и выборочного среднего квадратического отклонений

$$\frac{s_{(600)}}{s_{(20)}} \approx 0,986. \quad (3.21)$$

В следствии чего, результаты определения генеральной величины  $s_{(N)}$  или  $V_{(N)}$  уже по малой выборке считают вполне достоверными.

Например, в публикации [72] коэффициент вариации определен по 30 и 50 пробам. В патентной заявке [80] говорится о 64 элементарных объемах. Экспериментальные исследования [95] показывают, что количество опытов, достаточное для достоверного анализа степени однородности композиции с микротрейсерами равно 5.



Интересны рекомендации по величинам выборок, данные в отраслевых стандартах. Для асфальтобетонных дорожных смесей она должна быть не менее 3 проб [38]. Документ [131] регламентирует отбор 20 образцов муки и зерна для технологического контроля производства кормов для животных. При определении однородности критически важных кормовых добавок и ветеринарных лекарственных препаратов прибегают максимум к 10 наблюдениям [130].

Заметим, что необходимое для заданной степени точности анализа число проб  $n$  не сложно оценить, посчитав, что среднее квадратическое отклонение (3.18) так же, как и концентрация ключевого компонента является нормально распределенным.

Тогда, в случае  $n < 25$ , количество проб определяют на основании известных значений интеграла  $L(\dots)$ , аналога первообразной (3.16), но для плотности гауссового распределения следующей величины

$$\chi^2 = (n - 1) \frac{s_{(n)}^2}{s_{(N)}^2}. \quad (3.22)$$

Для чего, задав полную вероятность  $\alpha$ , имеющую в данном случае смысл достоверности выборки и показатель качества в виде

$$\varepsilon = q_s \cdot s_{(n)}, \quad (3.23)$$

относительно  $n$  решают по таблице трансцендентное уравнение

$$\alpha = L(q_s, k); \quad k = n - 1. \quad (3.24)$$

При количестве опытов  $n > 25$ , исследуют интеграл вероятностей величины

$$t = \frac{|s_{(N)} - s_{(n)}|}{\sigma_s}; \quad \sigma_s = \frac{s_{(N)}}{\sqrt{2N}} \approx \frac{s_{(n)}}{\sqrt{2n}}. \quad (3.25)$$

И число  $n$  вычисляют по формуле

$$n = \frac{t_\alpha}{2q_s^2}. \quad (3.26)$$

В которой  $t_\alpha$ , есть также получаемое из таблиц решение уравнения

$$\alpha = \Phi(t_\alpha), \quad (3.27)$$

где  $\Phi(\dots)$  — функция Лапласа.

Примеры расчетов [103], выполненные по формулам (3.23), (3.24), дают следующий результат — при величине показателя  $\varepsilon$  равной для большинства смесителей  $0,5 s_{(n)}[1]$ , 90-процентная достоверность эксперимента достигается уже при рассмотрении 9 проб.

Из вышеизложенного следует вывод: если на практике процесс смешения не является предметом анализа и в нем применяются макроскопические методы измерений, то для оценки качества смеси, обладающей стохастической природой, авторы используют коэффициент неоднородности (3.20) или величину среднего квадратического отклонения концентрации ключевого компонента в смеси (3.18). Причем, при их вычислении исследователи полагаются на вполне достоверные малые выборки.

## **3.2 Критерии оценки качества гетерогенных композиций и композитных материалов на основе принципа управляемой однородности**

### **3.2.1 Критерий оценки управляемой однородности гетерогенных смесей и композитных материалов, синтезируемых из дискретных потоков компонентов**

Вводные условия. Необходимо синтезировать гетерогенную композицию, состоящую из нескольких дискретных потоков компонентов. В соответствии с нормативными документами в данной композиции должно быть обеспечено заданное соотношение этих компонентов или соответственно их концентрации в определенном объеме (массе) смеси или композиции.

Тогда на основе математической модели п. 2.2 данной работы представляем новый **критерий оценки** управляемой однородности гетерогенных смесей и композитных материалов синтезируемых из **дискретных** потоков компонентов

$$p \left( \left| \frac{\mu_k}{k} - m \right| \leq \delta_\xi \right) \geq p_\xi, \quad (3.28)$$

где,  $\mu_k$  – текущая концентрация  $\xi$ -го компонента в композиции,  $m$  – номинальная, (заданная) концентрация  $\xi$ -го компонента,  $\delta_\xi$  – точность содержания или разброс концентрации в дозе композиции (в долях или %),  $p_\xi$  – доверительная вероятность обеспечения данной точности,  $k = k_{min}$  – минимальное требуемое число доз компонента в композиции, начиная с которого выполняется показанное условие.

Критерий оценки качества гетерогенной композиции однородности, которая формируется из дискретных потоков компонентов, применительно к каждому компоненту отдельно, можно озвучить следующим образом:

*«Гетерогенная композиция, синтезируемая из дискретных потоков компонентов с доверительной вероятностью  $p_\xi$ , или ее качество удовлетворяет некоторому заданному уровню в пределах не ниже заданной вероятности, если вероятность отклонения отношения текущего значения концентрации  $\xi$ -го компонента  $\mu_k$  к минимальному числу доз компонента  $k = k_{min}$ , в минимально необходимом объеме (массе) композита, от заданного номинального значения  $m$ , при нормированном его соотношении в композиции с точностью содержания не более  $\delta_\xi$ , больше или равна  $p_\xi$ ».*

Таким образом, определяя на практике точности содержания ключевого(ых) компонентов в единичной эффективной выборке смеси или композитного материала мы можем достоверно определить минимальные объемы (массы) композиций, в которых гарантированно будут обеспечены необходимые показатели их качества.

Причем эта задача имеет свойство инверсности, то есть может решаться и наоборот, как от «объемов и масс» к «показателям качества композиции», так и от «показателей качества композиции» к «объемам и массам» эффективных выборок использования продукции потребителем.

Это особенно эффективно при проектировании нового оборудования для синтеза гетерогенных композиций, когда на этапе разработки и создания машин можно закладывать в их технологические характеристики возможность

производить продукцию более высокого качества на перспективу, и наоборот, в какой-то степени, учитывая растущие предпочтения конечного потребителя к качеству продукции потребления делать прогнозы и рекомендации к созданию нового более совершенного оборудования.

Это позволит на практике, используя данный критерий в производственных условиях и зная некоторые технические и технологические режимы и параметры работы синтезирующего композиционного оборудования, иметь возможность управлять формированием однородности получаемой продукции и соответственно управлять конечными показателями ее качества.

Из разных источников [10,13,20,37,43-46,51,55,65,65-70,94,136-138,145-157] процесс формирования однородности можно считать стабильным, когда предполагается значение  $p_{\xi}$  на уровне 0,9 и более, точность дозирования компонентов и следующая из нее точность содержания в объеме массы смеси композита  $\delta_{\xi}$ , ввиду отсутствия объективной точной нормативной поддержки, варьируется произвольно в процентах или по традиционной коэффициенту вариации на уровне не ниже 2-4%. На сегодняшний день, любые данные показатели, выше или лучше представленных, определяют высокий или очень высокий уровень качества гетерогенных композиций.

При необходимости критерий можно использовать для каждого из компонентов композиции в отдельности, так как в современных условиях многие производители определяют сразу несколько ключевых компонентов [147-157]. Это эффективно можно осуществлять с помощью специально разработанного программного обеспечения [99] и управлять процессом формирования однородности в режиме реального времени.

Таким образом, осуществляется логическая оптимизация математической модели (п.2.2) и процессов ее вычислительной обработки, что позволяет обеспечить высокую сходимость результатов моделирования процессов немиксинга, анализа и управления формированием однородности гетерогенных композиций с полученными при реальном исследовании различных устройств синтеза композиций данными.

Результаты экспериментального исследования использования разработанного критерия для дискретных потоков компонентов представлены в п. 4.4.1 данной работы.

### **3.2.2 Критерий оценки управляемой однородности гетерогенных смесей и композитных материалов, синтезируемых из непрерывных потоков компонентов**

Вводные условия. Необходимо приготовить гетерогенную композицию, синтезируемую из нескольких непрерывных потоков компонентов. В соответствии с нормативными документами в данной композиции должно быть обеспечено заданное соотношение этих компонентов или соответственно их концентрации в определенном объеме (массе) смеси или композиции.

Тогда на основе математических моделей п. 2.3 данной работы представляем **критерий оценки** управляемой однородности гетерогенных смесей и композитных материалов синтезируемых из **непрерывных** потоков компонентов

$$|V(T) - A_*T| \leq \Delta, \quad (3.29)$$

где  $T$  – (текущее или заданное) время синтеза смеси или композита,  $V(T)$  – объем или масса компонента, отсекаемые за один или несколько технологических циклов (оборотов ротора или биротора, движения линейного транспортера и т.п.) за время  $T$ ,  $A_*$  – заданное, в соответствии с соотношением компонентов в композиции значение концентрации компонента,  $\Delta$  – заданная (гарантированная) точность содержания компонента в выборке композиции.

Критерий оценки качества гетерогенной композиции однородности, которая формируется из непрерывных потоков компонентов, применительно к каждому компоненту отдельно, можно озвучить следующим образом:

*«Гетерогенная композиция, синтезируемая из непрерывных потоков компонентов путем отсекаания от них микродоз по времени и упорядоченной укладкой их в полезном объеме, считается качественной по одному из*

*компонентов если разница значения одного или нескольких единично отсекаемых объемов или масс компонента  $V(T)$  за текущий момент времени синтеза смеси или композита  $T$  и произведения заданного значение концентрации компонента  $A_*$  за тот же период времени, в единичной эффективной выборке композиции по модулю меньше или равна заданной точности содержания данного компонента  $\Delta$ ».*

Здесь следует отметить, что синтез гетерогенных композиций из непрерывных потоков осуществляется как правило за несколько технологических циклов, образуя некое подобие «слоеной» структуры (рисунок 1.4). Это обусловлено технологическими особенностями производства многих видов продукции, использующих в своей структуре композиты или полностью состоящих из них, что в конечном итоге как раз и позволяет, за счет репрезентативности многослойного формирования однородности, обеспечивать анализ и возможность управления и обеспечения гарантированных показателей качества получаемых композиций.

Специфика приготовления смесей или композитов из непрерывных потоков компонентов носит иногда глубоко избирательных характер по отношению к выбору дозирующего оборудования. Так, например, технические алмазы очень сложно дозировать дискретными питателями, в силу повышенной твердости, износа рабочих поверхностей и малости удельного расхода. Поэтому в экспериментальной части данного исследования (п. 4.3.3) представлены результаты опытов при дозировании данного компонента именно непрерывными шнековыми дозаторами, используемыми в установке двойного (непрерывного и временного) дозирования показанной на рисунке 3.2 или методом, представленным в работе [94].

Таким образом, однородность получаемых данным способом композиций, а соответственно и их качество определяется и управляется с помощью двух основных производственных факторов:

– точности (стабильности) выдаваемых потоков компонентов, определяемых исключительно конструкцией и режимами работы дозирующих устройств и

– количеством необходимых технологических циклов работы оборудования, обеспечивающих нужную структуру (однородность) синтезируемой композиции, определяемого назначением и спецификой использования конечного продукта.

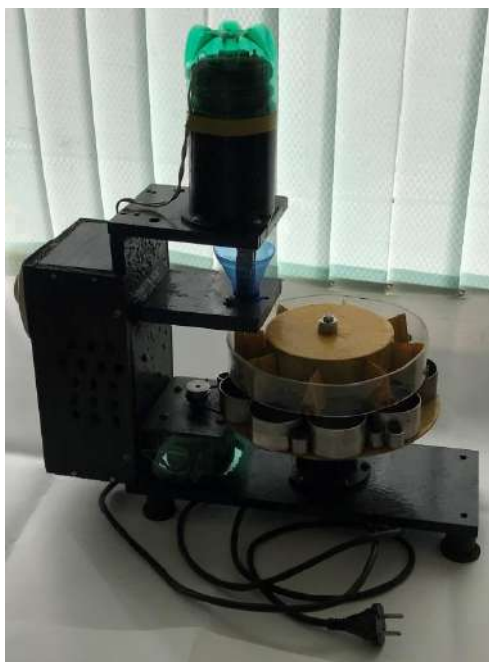


Рисунок 3.2 – Экспериментальная установка двойного непрерывного временного дозирования гетерогенных компонентов

По аналогии с первым критерием оценки качества гетерогенных композиций (п. 3.2.1), задача управления формированием однородности также имеет свойство инверсности. Только в данном приложении качество получаемых композиций можно обеспечивать не только за счет изменения количества полезных циклов синтеза, то есть технологически, но и за счет переналадки или использования более совершенных конструкций дозирующих компоненты устройств, то есть конструкторски, максимально стабилизируя параметр (функцию)  $V(T)$ . При этом процесс организации производства качественного или

более качественного изделия может носить реверсивный характер: либо от «оборудования» к «продукту», либо наоборот.

Это также эффективно при проектировании оборудования для синтеза гетерогенных композиций из непрерывных потоков компонентов, когда на этапе разработки и создания машин можно закладывать в их технологические характеристики возможность производить продукцию более высокого качества, используя данный критерий организационно или в виде прикладного программного обеспечения на реальных производственных площадках.

Из разных источников [2,10,14,24,27,41,43-46,54,58,59,65-70,77,94,101,120,121,140-142,146,154] процесс формирования однородности композиций из непрерывных потоков составляющих компонентов можно считать стабильным, когда точность дозирования компонентов осуществляется на уровне не ниже 5-9%. Этих показателей недостаточно для синтеза высококачественных композиций. Поэтому в данной работе для практических исследований использованы тонкоструйные шнековые питатели малой производительности с разбросом масс и объемов микродоз не более 2-3%. При этом формирование упорядоченной структуры композиций осуществлялось, в том числе и за несколько технологических циклов, что позволило обеспечить формирование однородности компонентов в готовых изделиях на уровне менее 2% (п. 4.2.2)

Данный критерий можно использовать для каждого из компонентов композиции в отдельности, так как в современных условиях многие производители определяют сразу несколько ключевых компонентов [147-157]. Таким образом, осуществляется логическая оптимизация математической модели (п. 2.3.1) и процессов ее вычислительной обработки, что позволяет обеспечить высокую сходимость результатов моделирования процессов нонмиксинга, анализа и управления формирования однородности гетерогенных композиций с полученными при реальном исследовании различных устройств синтеза композиций данными.



Результаты экспериментального исследования использования разработанного критерия для непрерывных потоков компонентов представлены в п. 4.5.2 данной работы.

### **3.3 Выводы по главе**

В этой главе автором обосновано использование понятия «однородность» гетерогенной композиции как основной признак и параметр, определяющий показатели качества получаемой продукции.

Также сформулирована концепция технологического обеспечения «управляемой однородности», как основного инструмента формирования и управления показателями качества получаемых композиций.

На основе результатов теоретических исследований представленные в этой и второй главе данного исследования обоснованы и разработаны новые альтернативные традиционному критерию анализа, и управления качеством получаемых на новом классе оборудования – нонмиксеров, гетерогенных композиций с гарантированными высокими показателями качества.

Критерии разработаны для двух различных по своей технологической природе процессах формирования однородности композиций:

- синтезируемых их дискретных потоков компонентов и
- синтезируемых из непрерывных потоков компонентов,

что обусловлено спецификой использования широкой морфологии дозирующих устройств, для компонентов с различными физико-механическими свойствами, используемых во многих отраслях промышленности.

## **4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЯЕМОГО ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОРОДНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СМЕСЕЙ И КОМПОЗИЦИЙ**

В главе представлены анализ и результаты экспериментальных исследований процессов дозирования и синтеза смесей и композитов на различных типах дозирующих устройств и смесительного (нонмиксингового) оборудования. Основной целью экспериментов является подтверждение теоретических разработок, представленных во 2 и 3 главах работы.

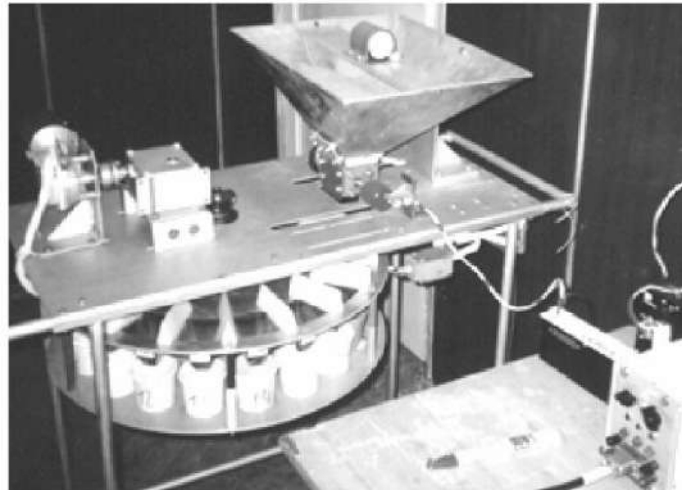
### **4.1 Экспериментальное оборудование для синтеза гетерогенных смесей и композитных материалов из дискретных и непрерывных потоков компонентов**

Для синтеза гетерогенных композиций, большое значение имеют такие показатели работы дозирующих устройств, применяемых в различных конструкциях нонмиксеров, как точность выдачи микродоз или потоков компонентов и стабильность этой выдачи. Эти показатели в наибольшей степени определяют качество получаемых смесей и композиций. Возможность анализа данных параметров наиболее эффективна при обработке экспериментальных данных эксплуатации подобных устройств [20,22,23,29,31-33,36,41,43-45,48,51,54,76-93,97,98,105,106,108,117,120,136, 137,142-144,146,156].

На рисунке 4.1 представлены опытные установки для синтеза гетерогенных смесей и композитов, а на рисунке 4.2 показаны соответствующие устройства для дозирования, составляющих их компонентов: на рисунке 4.2,а шнековый питатель для формирования *непрерывных* потоков компонентов, на рисунке 4.2,б – роторный конический питатель для формирования *дискретных* потоков компонентов [10,41,44,91,115].



а)



б)

Рисунок 4.1 – Опытно-экспериментальные установки для получения гетерогенных смесей и композитов: а) при непрерывном дозировании компонентов, б) при дискретном дозировании компонентов

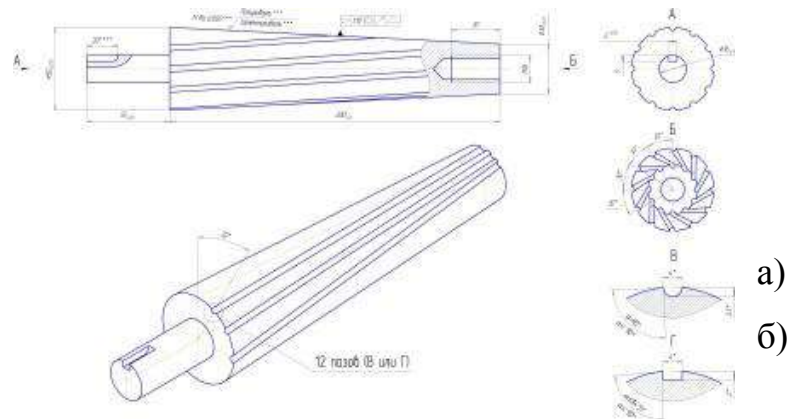
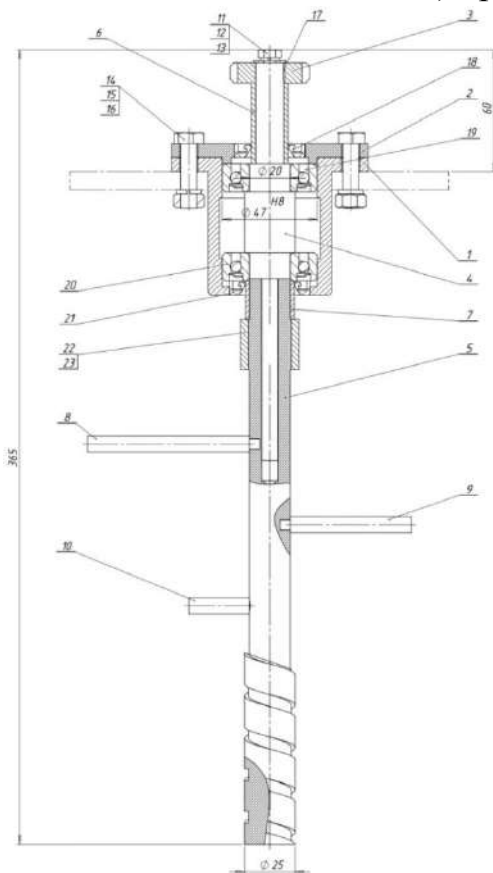
а)  
б)

Рисунок 4.2 – Устройства дозирования компонентов: а) шнековый – для непрерывного дозирования, б) роторный – для дискретного дозирования

## **4.2 Экспериментальные исследования работы дискретных и непрерывных дозирующих устройств**

### **4.2.1 Результаты экспериментальных исследований дозирования некоторых компонентов шнековыми питателями, формирующих их непрерывные потоки**

При управляемом формировании однородности смеси или композита дозирование может осуществляться непосредственно шнековым питателем, а также при помощи вращающегося ротора с тарамы для компонентов, расположенного ниже питателя. Точность дозирования компонентов определяется как соответствие суммарной массы дозы и массы дозы, изменяющейся при увеличении оборотов ротора.

В ходе работы устройства (рисунок 4.1,а) плотность потока изменяется. В частности, наибольшее влияние на уплотнение потока компонента оказывается при прохождении отсекателем дозатора. Учитывая конструкцию отсекателя, а также то, что высота потока компонента гораздо больше той, при которой происходило уплотнение компонента, было допущено, что плотность потока компонента была практически одинакова. В связи с этим, было предположено, что экспериментальные массы доз равнозначны массам доз, полученным математическим сложением.

Для опытных и суммарных масс доз медного порошка [15,26] определены средние значения, дисперсии и средние квадратичные отклонения, а также значения соответствия закону Гаусса (таблица 4.1, рисунки 4.3-4.4), так как это условие использовано при математическом моделировании во второй главе работы.

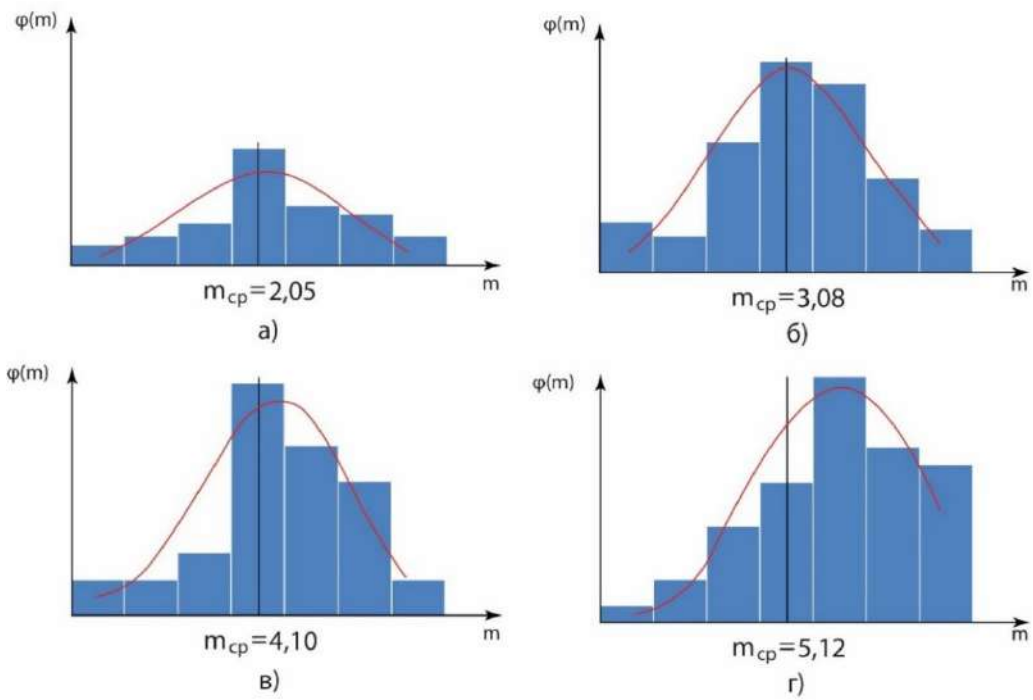


Рисунок 4.3 – Графики полигона и теоретической кривой распределения для медного порошка: а) двух масс доз; б) трех масс доз; в) четырех масс доз; г) пяти масс доз

Таблица 4.1

Масса дозы	$m_{cp}$	$D$	$S$	$\chi^2$	$P(\chi^2)$
Для 6 оборотов ротора	1,03	0,00126	0,0355	2,7	0,6824
Для 10 оборотов ротора	1,69	0,00254	0,0504	5,7	0,2256
Для 14 оборотов ротора	2,35	0,00376	0,0613	6,0	0,1991
Для 18 оборотов ротора	3,02	0,00583	0,0763	4,8	0,3110
Для 22 оборотов ротора	3,69	0,00925	0,0962	3,6	0,4667
Для двух	2,05	0,00266	0,0516	5,5	0,2432
Для трех	3,08	0,00430	0,0655	4,5	0,3466
Для четырех	4,10	0,00637	0,0798	7,5	0,1376
Для пяти	5,12	0,00815	0,0903	4,3	0,3704

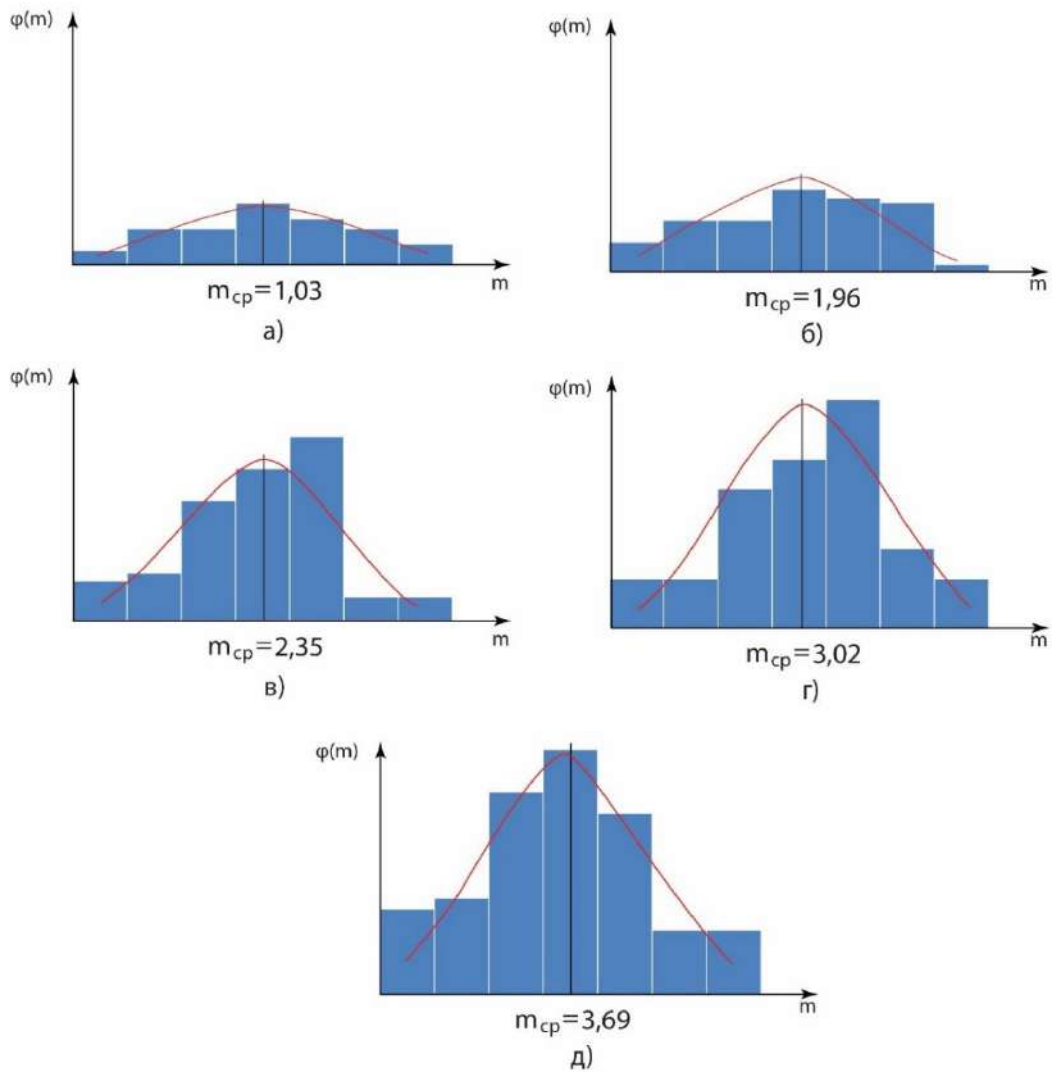


Рисунок 4.4 – Графики полигона и теоретической кривой распределения массы доз медного порошка: а) при 6 оборотах; б) при 10 оборотах; в) при 14 оборотах; г) при 18 оборотах; д) при 22 оборотах

#### 4.2.2. Результаты экспериментальных исследований дозирования некоторых компонентов роторными питателями, формирующих их дискретные потоки

Экспериментальные массы равнозначны массам, полученным математическим сложением, так как дисперсии проверочных точек близки друг к другу, различие между коэффициентами корреляции незначительно. Исходя из этого, для каждого компонента был произведен расчет двух, трех, четырех и пяти масс. Результаты обработки данных для цемента [25] представлены в таблице 4.2 и на рисунке 4.5.

Таблица 4.2

Масса дозы	$m_{cp}$	$D$	$S$	$\chi^2$	$P(\chi^2)$	$2\delta$	$K_T$
Одна масса	2,94	0,22587	0,47526	4,3	0,3704	0,353	8,08
Две массы	5,86	0,45876	0,67732	4,7	0,3229	0,586	6,94
Три массы	8,78	0,63302	0,79563	1,4	0,8402	0,878	5,44
Четыре массы	11,72	0,78464	0,88580	4,1	0,3941	1,055	5,04
Пять масс	14,67	0,88260	0,93947	4,1	0,3941	1,320	4,27

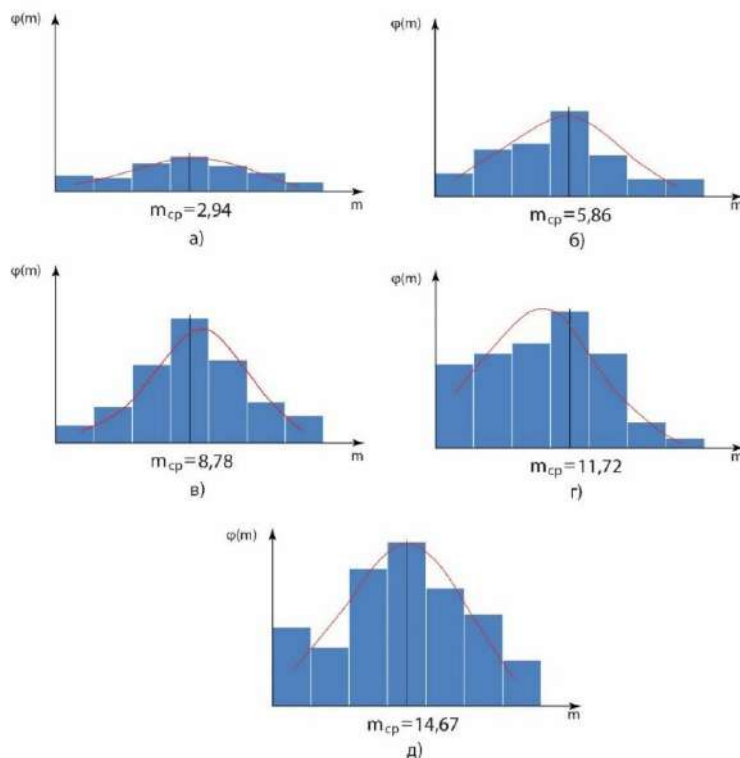


Рисунок 4.5 – Графики полигона и теоретической кривой распределения масс доз цемента для: а) двух масс; б) трех масс; в) четырех масс; г) пяти масс

Результаты обработки данных для карбоната кальция [30] представлены в таблице 4.3 и на рисунке 4.6.

Таблица 4.3

Масса дозы	$m_{cp}$	$D$	$S$	$\chi^2$	$P(\chi^2)$	$2\delta$	$K_T$
Одна масса	2,95	0,01942	0,13935	3,8	0,4364	0,354	2,36
Две массы	5,89	0,04297	0,20730	3,9	0,4212	0,589	2,11
Три массы	8,82	0,07508	0,27400	6,0	0,1991	0,882	1,86
Четыре массы	11,76	0,13457	0,36684	3,4	0,4971	1,058	2,08
Пять масс	14,69	0,16334	0,40416	2,4	0,6468	1,322	1,83

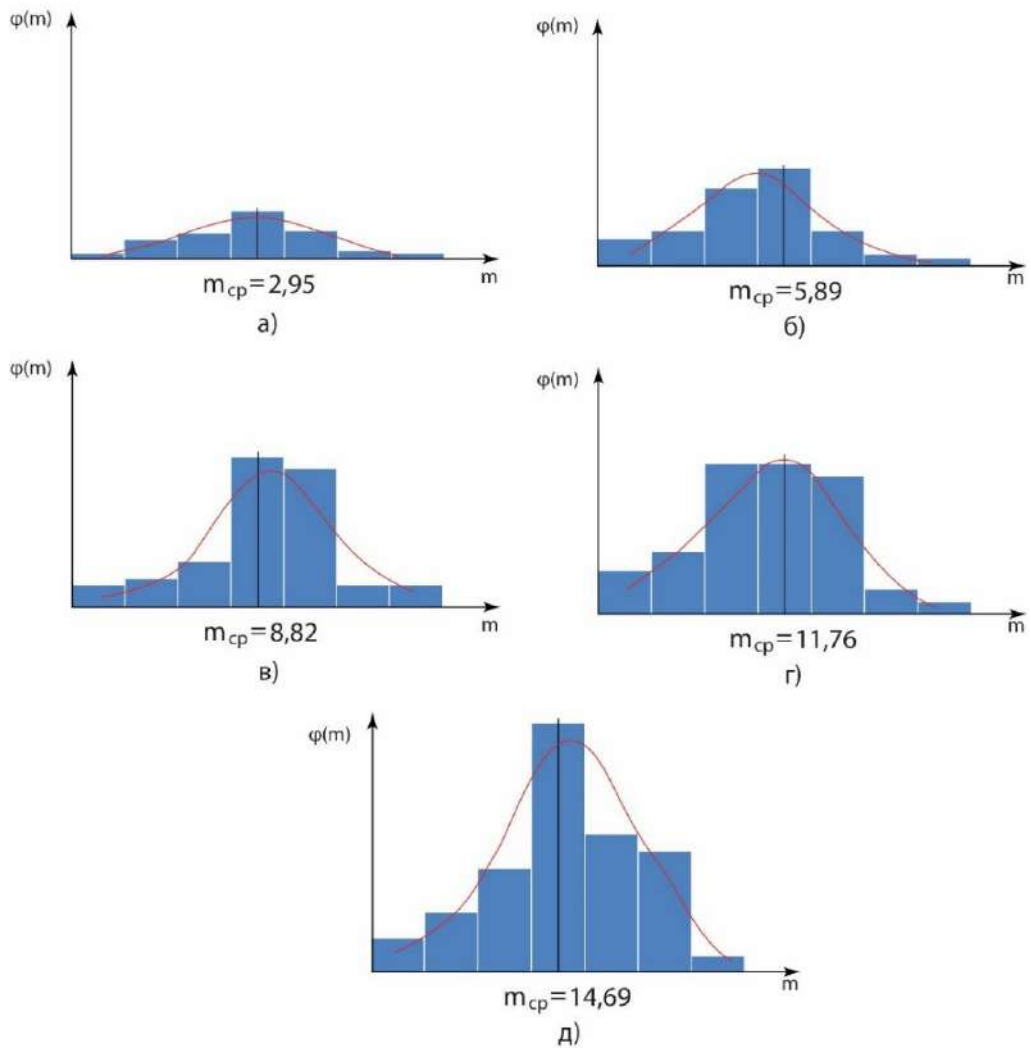


Рисунок 4.6 – Графики полигона и теоретической кривой распределения масс доз карбоната кальция: а) для двух масс; б) для трех масс; в) для четырех масс; г) для пяти масс

Результаты обработки данных для *ферротитана*, дозируемого роторными питателями дискретного действия [27], представлены в таблице 4.4 и на рисунке 4.7.

Таблица 4.4

Масса дозы	$m_{cp}$	$D$	$S$	$\chi^2$	$P(\chi^2)$	$2\delta$	$K_T$
Одна масса	2,54	0,10238	0,31997	5,5	0,2432	0,305	6,29
Две массы	5,06	0,24037	0,49028	6,8	0,1458	0,506	5,81
Три массы	7,58	0,38705	0,62214	5,8	0,2167	0,758	4,92
Четыре массы	10,12	0,47363	0,68821	7,9	0,0916	0,911	4,53
Пять масс	12,67	0,61068	0,78146	3,6	0,4667	1,140	4,11



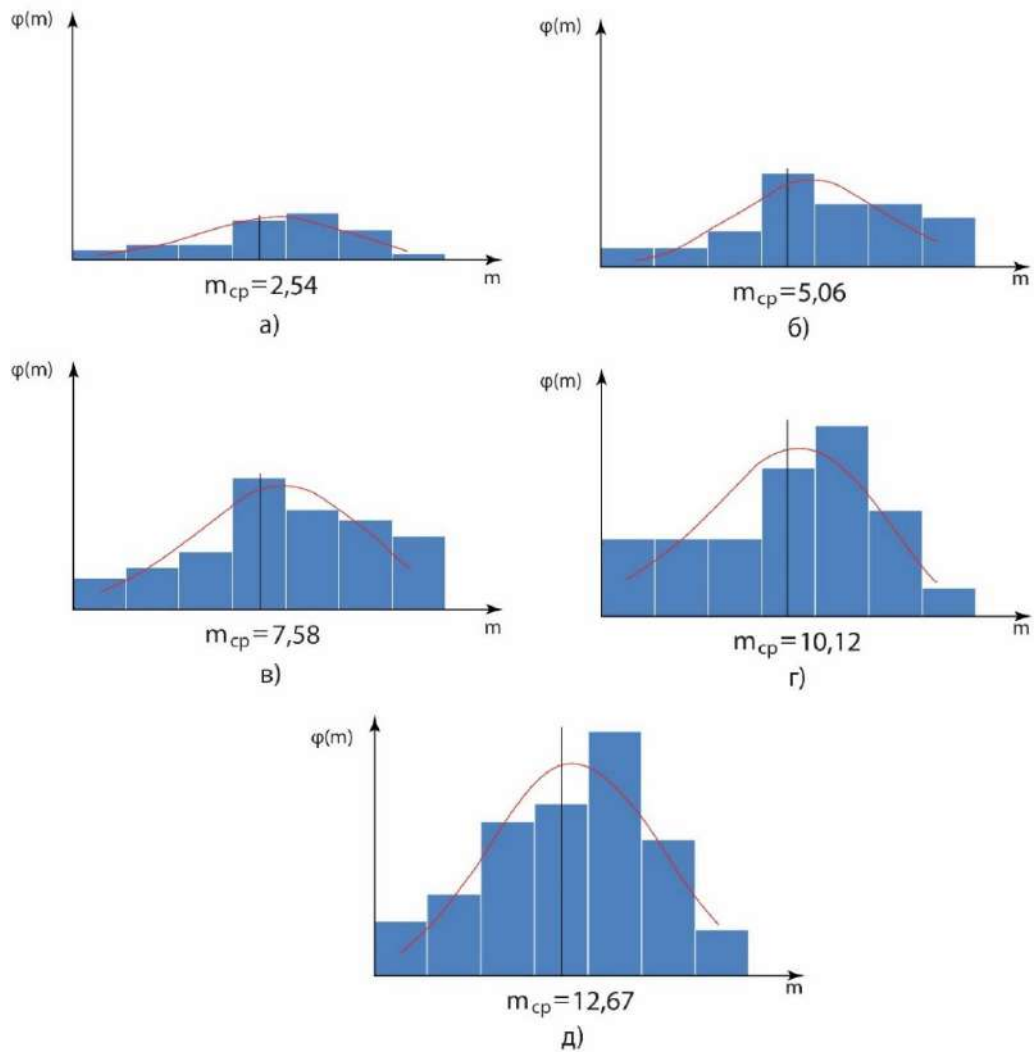


Рисунок 4.7 – Графики полигона и теоретической кривой распределения масс доз ферротитана: а) для двух масс; б) для трех масс; в) для четырех масс; г) для пяти масс

### 4.3 Результаты экспериментальных исследований получения гетерогенных смесей и композитов из дискретных и непрерывных потоков компонентов

#### 4.3.1 Получение смеси длинномерной (штучной) продукции с соотношением компонентов до 1:10

Получение высококачественных гетерогенных смесей штучных компонентов (трубчатых длинномеров) различной номенклатуры и физико-механических свойств является актуальной межотраслевой проблемой. Ниже

рассмотрены результаты экспериментальных опытов получения гетерогенных смесей длинномерной продукции с соотношением компонентов в композиции до 1:10. Для проведения экспериментов использованы линейные дискретные нонмиксеры, результаты опытов по дозированию и проблематика представлены в работах [44,65,67,93,126,127].

Содержание компонентов в смеси, получаемой стохастическим традиционным методом, представлены на рисунке 4.8, в таблице 4.5.

Для упрощения визуализации полученных практических результатов экспериментов, здесь и далее, все смеси и композитные материалы представлены как трехкомпонентные системы, хотя содержание компонентов в них доходило до десяти и более наименований. При этом в качестве трех составляющих полученных гетерогенных смесей и композитных материалов представлены наиболее функционально важные компоненты: наполнитель (с максимальной концентрацией) и два матричных компонента (ключевых и самых малосодержащихся). Это обусловлено прежде всего критичностью технологии получения смесей и композитов именно по обеспечению их однородности.

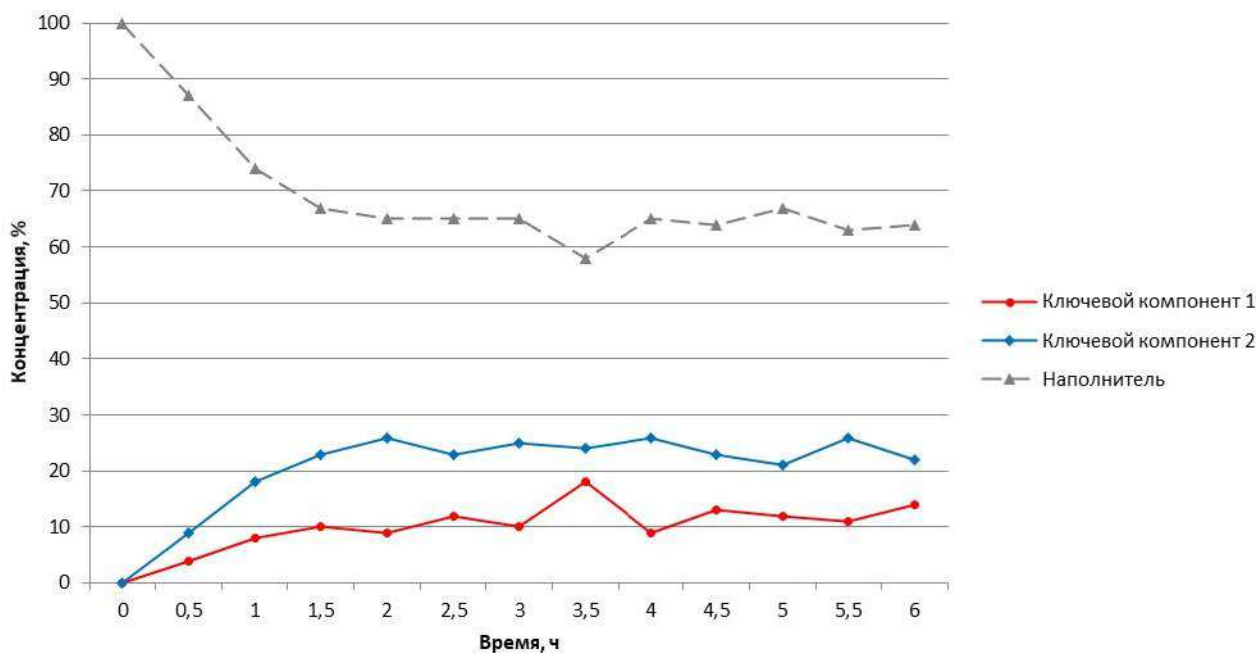


Рисунок 4.8 – Показатели качества смеси длинномерной продукции при традиционном формировании однородности

Таблица 4.5

Время смещения, ч	Ключевой компонент 1	Ключевой компонент 2	Наполнитель
0	0	0	100
0,5	4	9	87
1	8	18	74
1,5	10	23	67
2	9	26	65
2,5	12	23	65
3	10	25	65
3,5	18	24	58
4	9	26	65
4,5	13	23	64
5	12	21	67
5,5	11	26	63
6	14	22	62

Управляемое формирование однородности смеси можно обеспечить за счет наложения слоев гетерогенных компонентов друг на друга, образуя непрерывное наложение. Результаты распределения концентраций в смеси с управляемой однородностью показаны на рисунке 4.9, таблице 4.6.

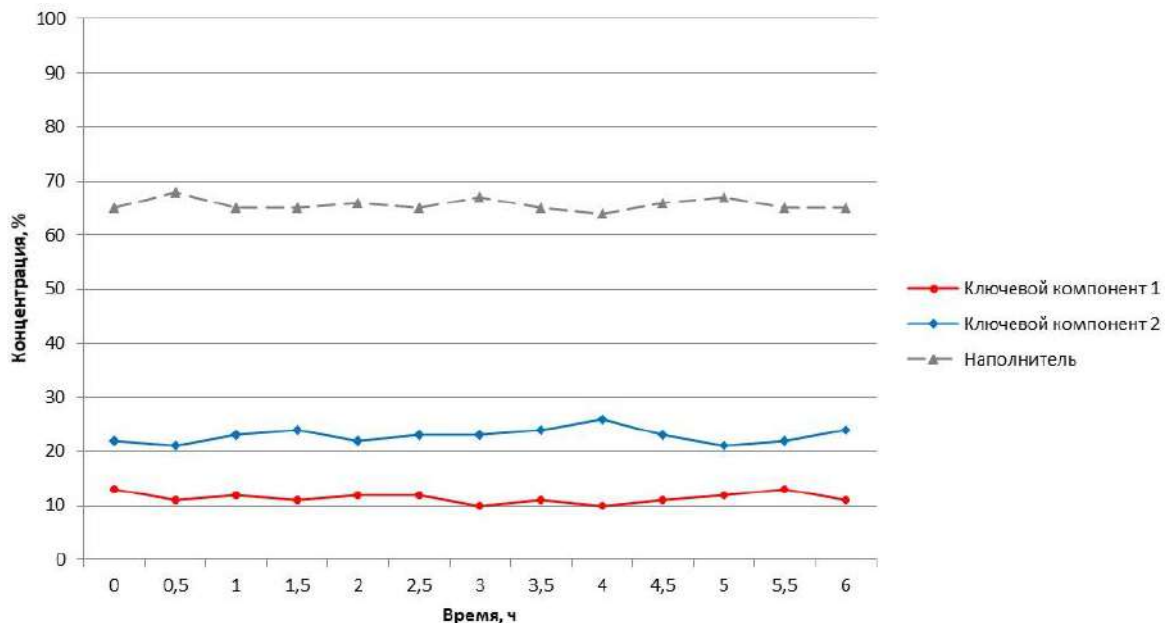


Рисунок 4.9 – Показатели качества смеси длиномерной продукции при управляемом формировании однородности

Таблица 4.6

Время синтеза, ч	Ключевой компонент 1	Ключевой компонент 2	Наполнитель
0	13	22	65
0,5	11	21	68
1	12	23	65
1,5	11	24	65
2	12	22	66
2,5	12	23	65
3	10	23	67
3,5	11	24	65
4	10	26	64
4,5	11	23	66
5	12	21	67
5,5	13	22	65
6	11	24	65

В результате проведенных экспериментов для длинномеров получены следующие показатели качества смесей (композиций) при соответствующих способах формирования однородности и методиках отбора и анализа проб.

В первом случае смешение проводилось в кубических емкостях (аналог барабанного смесителя с горизонтальной осью вращения, во втором – на конвейерном нонмиксере с горизонтальными роторными питателями при автоматическом формировании функциональной единичной дозы смеси (композиции), которая анализировалась как проба [126]. Получены следующие значения отклонения концентраций от заданной рецептуры.

Максимальные **абсолютные** отклонения  
содержания 1-го компонента (*hard*-компонент) в пробах

При <b>ТРАДИЦИОННОМ</b> <b>СМЕШЕНИИ</b> <i>с остановкой агрегата для отбора</i> проб		При <b>НОНМИКСИНГЕ</b> с <i>непрерывным дискретным</i> <i>формированием (синтезом)</i> <i>однородности (показателей</i> <i>качества)</i> функциональных единиц смеси (композиции)	
0-2 часа	9%	0-2 часа	2%
2-4 часа	9%	2-4 часа	2%
4-6 часов	5%	4-6 часов	3%

Минимальное **относительное** улучшение показателей качества за анализируемый период синтеза смеси или композита, отбора и анализа проб:  $N_{y_{min}}^T$  – отношение концентраций компонента в единичной эффективной дозе смеси или композита, полученной традиционным способом к полученной способом при управляемом формировании однородности – в  $\frac{5\%}{3\%} = 1,7$  раза. Максимальное соответственно: – в  $\frac{9\%}{2\%} = 4,5$  раза.

Максимальные отклонения содержания 2-го компонента  
(*bad*-компонент) в пробах

При <b>ТРАДИЦИОННОМ</b> <b>СМЕШЕНИИ</b> с остановкой агрегата для отбора проб		При <b>НОНМИКСИНГЕ</b> с <i>непрерывным дискретным</i> <i>формированием (синтезом)</i> <i>однородности (показателей</i> <i>качества)</i> функциональных единиц смеси (композиции)	
0-2 часа	26%	0-2 часа	3%
2-4 часа	4%	2-4 часа	4%
4-6 часов	5%	4-6 часов	3%

$$N_{y_{min}}^T = 1,0. N_{y_{max}}^T = 8,7.$$

Максимальные отклонения содержания наполнителя  
(*mid*-компонент) в пробах

При <b>ТРАДИЦИОННОМ</b> <b>СМЕШЕНИИ</b> с остановкой агрегата для отбора проб		При <b>НОНМИКСИНГЕ</b> с <i>непрерывным дискретным</i> <i>формированием (синтезом)</i> <i>однородности (показателей</i> <i>качества)</i> функциональных единиц смеси (композиции)	
0-2 часа	35%	0-2 часа	3%
2-4 часа	7%	2-4 часа	3%
4-6 часов	5%	4-6 часов	3%

$$N_{y_{min}}^T = 1,7. N_{y_{max}}^T = 11,7.$$

### **4.3.2 Получение композитных бетонов с соотношением компонентов до 1:10**

Сухой строительный бетон – это смесь цемента, песка и щебня в нужной пропорции без добавления воды. Композитный бетон – это смесь обычного строительного бетона как наполнителя и соответствующих добавок-модификаторов. Получение высококачественных композитных бетонов различной номенклатуры и физико-механических свойств является актуальной производственной задачей [11,13,14,79,81,94,105,108]. Точность содержания компонентов в бетонной смеси обуславливает ее прочностные и эксплуатационные характеристики.

В качестве ключевых компонентов выбраны соответственно цемент и комплекс антиобледеняющих добавок, в качестве наполнителя – смесь песка с щебнем или доломитом. Ниже рассмотрены результаты экспериментальных опытов получения гетерогенных бетонных смесей с соотношением компонентов в композиции до 1:10.

Для проведения первой части экспериментов по оценке качества получаемых бетонных смесей использованы традиционные тарельчатые миксеры периодического действия с рабочим объемом чаши  $3 \text{ м}^3$  и единовременной загрузкой бетонной композиции от  $0,5$  до  $2,25 \text{ м}^3$  [5,11,132,133,143,147,148,156]. Содержание компонентов в бетонной смеси, получаемой стохастическим методом, представлены на рисунке 4.10, в таблице 4.7.

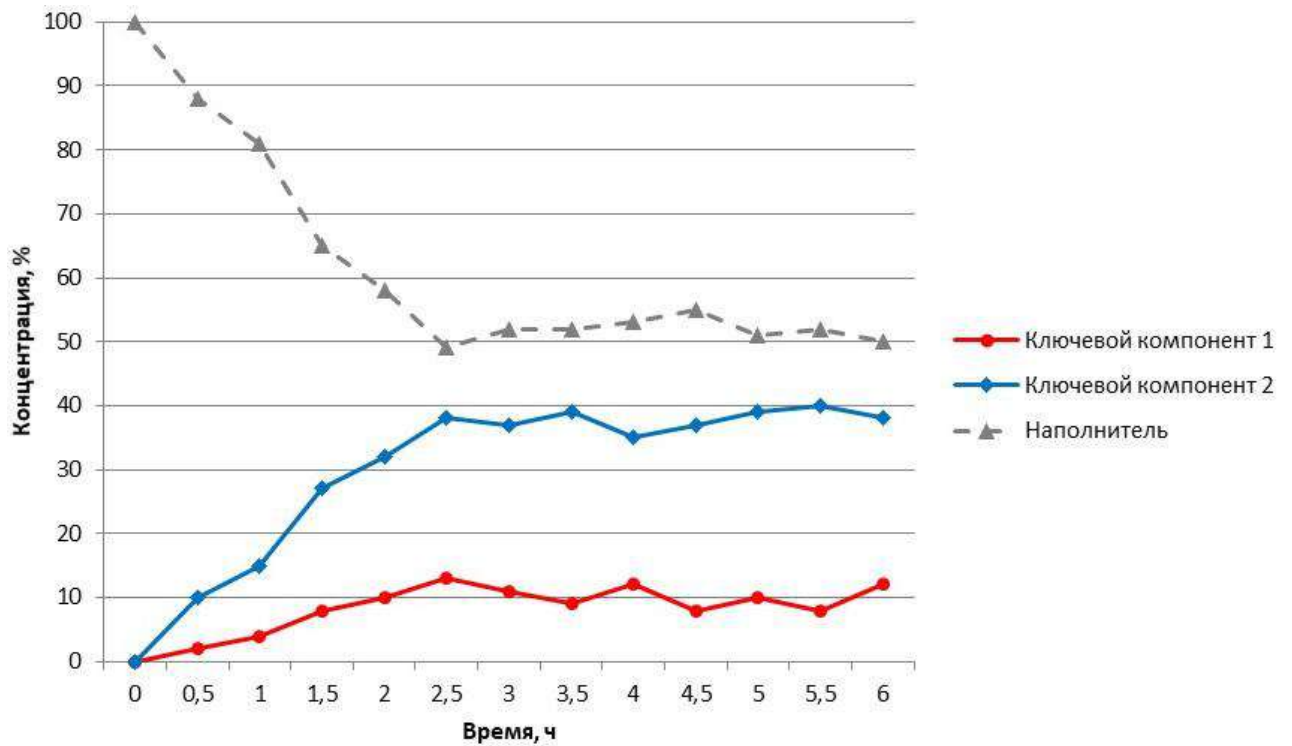


Рисунок 4.10 – Показатели качества композитных бетонов при традиционном формировании однородности

Концентрации наполнителя и компонентов бетона, получаемые в результате управляемого формирования однородности на линейном конвейерном нонмиксере с горизонтальными барабанными дискретными дозаторами [7,13,14,44,83,152], показаны на рисунке 4.11, таблице 4.8.

Таблица 4.7

Время смешения, ч	Ключевой компонент 1	Ключевой компонент 2	Наполнитель
0	0	0	100
0,5	2	10	88
1	4	15	81
1,5	8	27	65
2	10	32	58
2,5	13	38	49
3	11	37	52
3,5	9	39	52
4	12	35	53
4,5	8	37	55

5	10	39	51
5,5	8	40	52
6	12	38	50

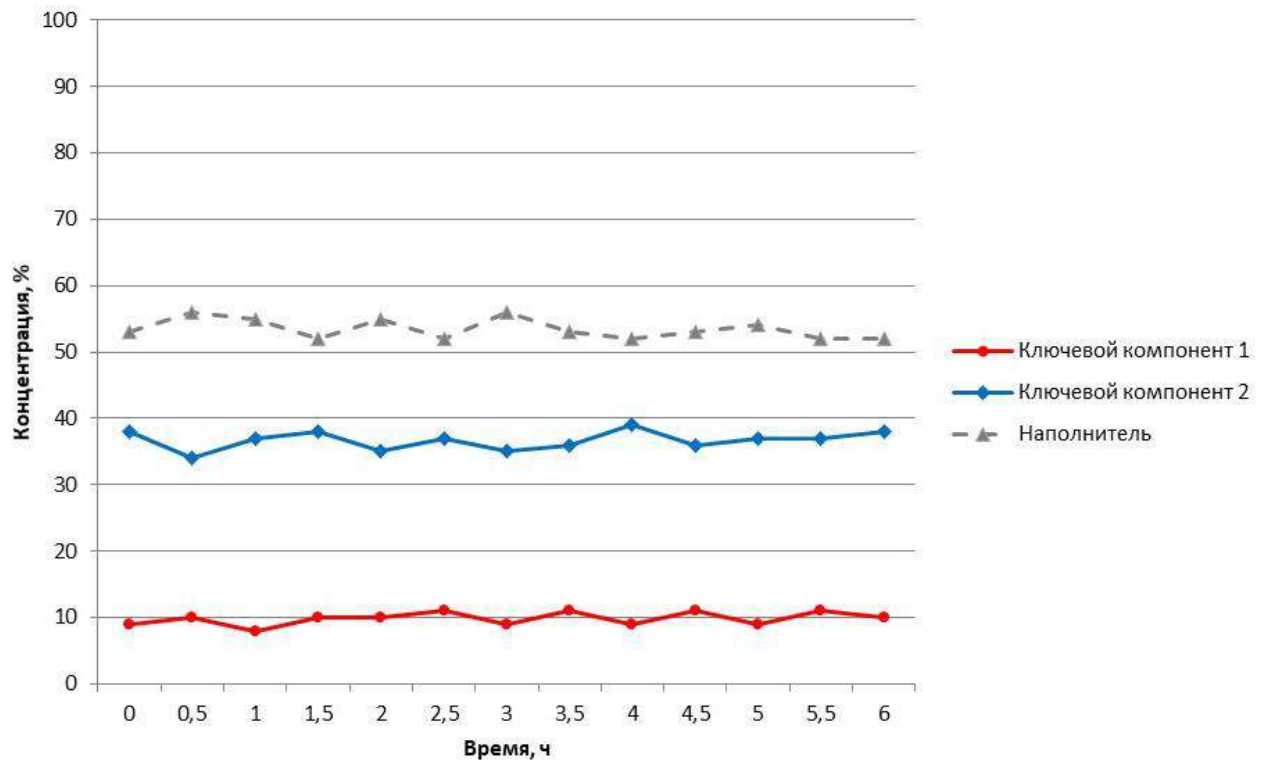


Рисунок 4.11 – Показатели качества композитных бетонов при управляемом формировании однородности

Таблица 4.8

Время синтеза, ч	Ключевой компонент 1	Ключевой компонент 2	Наполнитель
0	9	38	53
0,5	10	34	56
1	8	37	55
1,5	10	38	52
2	10	35	55
2,5	11	37	52
3	9	35	56
3,5	11	36	53
4	9	39	52
4,5	11	36	53
5	9	37	54
5,5	11	37	52
6	10	38	52



В результате проведенных экспериментов для бетонных композиций получены следующие показатели их качества при соответствующих способах формирования однородности и методиках отбора и анализа проб.

Максимальные отклонения содержания 1-го компонента  
(антиобледеняющие добавки) в пробах

При <b>ТРАДИЦИОННОМ СМЕШЕНИИ</b> с остановкой агрегата для отбора проб		При <b>НОНМИКСИНГЕ</b> с непрерывным дискретным формированием (синтезом) однородности (показателей качества) функциональных единиц смеси (композиции)	
0-2 часа	10%	0-2 часа	2%
2-4 часа	3%	2-4 часа	2%
4-6 часов	4%	4-6 часов	2%

$$N_{y_{min}}^T = 1,5. N_{y_{max}}^T = 5,0.$$

Максимальные отклонения содержания 2-го компонента (цемент) в пробах

При <b>ТРАДИЦИОННОМ СМЕШЕНИИ</b> с остановкой агрегата для отбора проб		При <b>НОНМИКСИНГЕ</b> с непрерывным дискретным формированием (синтезом) однородности (показателей качества) функциональных единиц смеси (композиции)	
0-2 часа	32%	0-2 часа	4%
2-4 часа	7%	2-4 часа	4%
4-6 часов	5%	4-6 часов	3%

$$N_{y_{min}}^T = 1,25. N_{y_{max}}^T = 10,7.$$

Максимальные отклонения содержания наполнителя  
(песчано-гравийная смесь) в пробах

При <b>ТРАДИЦИОННОМ СМЕШЕНИИ с остановкой агрегата для отбора</b> проб		При <b>НОНМИКСИНГЕ с непрерывным дискретным формированием (синтезом) однородности (показателей качества) функциональных единиц смеси (композиции)</b>	
0-2 часа	42%	0-2 часа	4%
2-4 часа	9%	2-4 часа	3%
4-6 часов	5%	4-6 часов	2%

$$N_{y_{min}}^T = 1,25. N_{y_{max}}^T = 21,0.$$

### 4.3.3 Получение композитных порошковых смесей для изготовления абразивного инструмента на основе медных связок с соотношением компонентов до 1:50

Сухие медно-оловянные связки используются в инструментальном производстве при изготовлении композитного абразивного инструмента. В нашем случае – алмазных отрезных кругов, в качестве матрицы которых обычно используется металлический диск с радиальными насечками [153].

Качество смеси медно-оловянных порошков и технических алмазов в значительной степени определяет техническую стойкость и эффективность использования данного вида инструмента. Поэтому получение смесей порошковых материалов для изготовления абразивного (алмазного) инструмента различной номенклатуры и физико-механических свойств является актуальной задачей [72,114,115,148].

Для эксперимента в качестве ключевых компонентов выбраны соответственно технические алмазы и оловянная связка, в качестве наполнителя – медный порошок. Ниже рассмотрены результаты экспериментальных опытов получения гетерогенных смесей с соотношением компонентов в композиции до 1:50.

Для проведения первой части экспериментов по оценке качества металлических порошковых смесей, получаемых традиционным способом

использован барабанный смеситель типа «пьяная бочка» периодического действия с рабочим объемом барабана 0,0018 м<sup>3</sup> [9,53,125,151].

Полученные зависимости концентрации ключевых компонентов и наполнителя от времени смешения представлены на рисунке 4.12, в таблице 4.9.

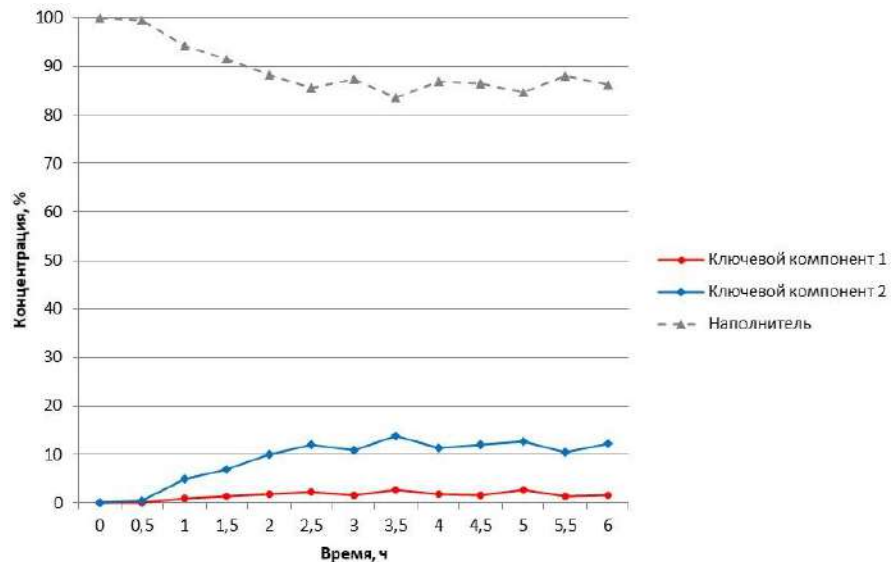


Рисунок 4.12 – Показатели качества металлических порошковых композиций при традиционном формировании однородности

Таблица 4.9

Время смешения, ч	Ключевой компонент 1	Ключевой компонент 2	Наполнитель
0	0	0	100
0,5	0,9	5	94,1
1	1,4	7	91,6
1,5	1,9	10	88,1
2	2,4	12	85,6
2,5	1,6	11	87,4
3	2,7	13,8	83,5
3,5	1,9	11,3	86,8
4	1,6	12	86,4
4,5	2,7	12,7	84,6
5	1,5	10,5	88
5,5	1,6	12,2	86,2
6	0	0,5	99,5

Для проведения второй части экспериментов по оценке качества металлических порошковых композиций, получаемых методом формирования

управляемой однородности использован роторный нонмиксер со шнековыми питателями компонентов, что обусловлено их повышенной износостойкостью по сравнению с другими дозирующими устройствами при формировании непрерывных тонкоструйных потоков технических алмазов и оловянной связки [16,17,42,44,45,91].

Концентрации ключевых компонентов (алмазов и олова) и наполнителя (медного порошка), получаемые в результате формирования управляемой однородности композитной смеси, показаны на рисунке 4.13, в таблице 4.10.

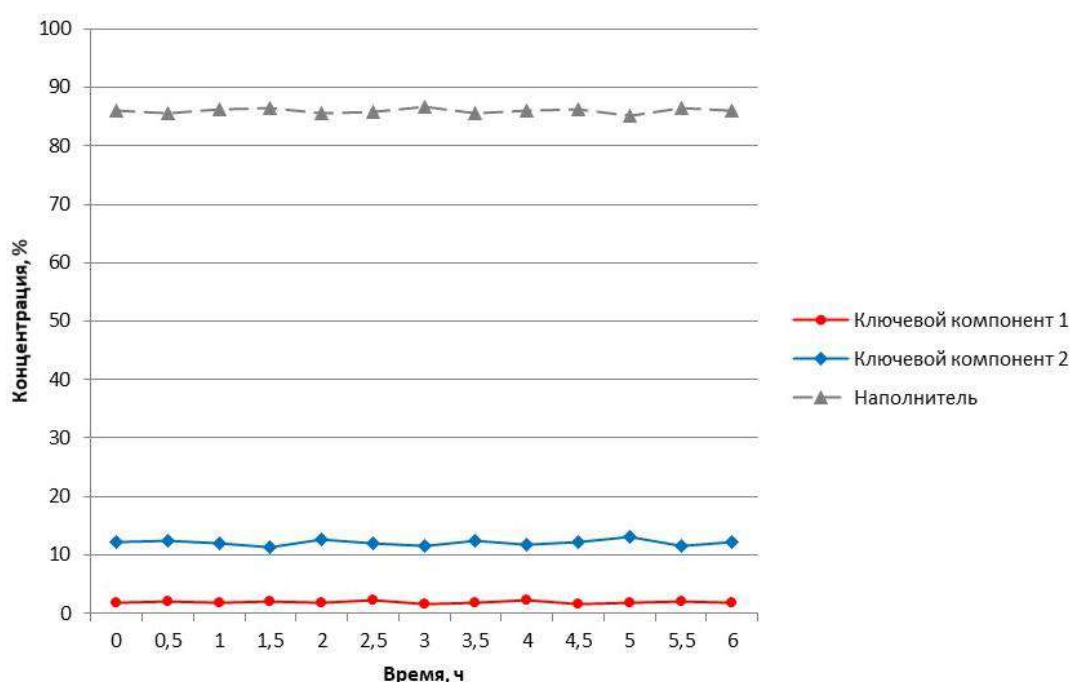


Рисунок 4.13 – Показатели качества металлических порошковых композиций при управляемом формировании однородности

Таблица 4.10

Время синтеза, ч	Ключевой компонент 1	Ключевой компонент 2	Наполнитель
0	1,8	12,1	86,1
0,5	2	12,4	85,6
1	1,8	12	86,2
1,5	2,1	11,4	86,5
2	1,8	12,7	85,5
2,5	2,2	12	85,8

3	1,7	11,6	86,7
3,5	1,9	12,5	85,6
4	2,2	11,8	86
4,5	1,7	12,1	86,2
5	1,9	13	85,1
5,5	2	11,6	86,4
6	1,8	12,2	86

В первом случае контрольные пробы отбирались и анализировались традиционными методами [72] при остановке смесителя через определенные промежутки времени – 1..2 часа. Во втором случае анализ получаемых проб производился визуально непосредственно на оснастке (матрице) отрезного круга при его формировании внутри нонмиксера с помощью микроскопа Carl Zeiss Neophot – 21 [8,42,45].

В результате проведенных экспериментов для порошковых металлических композиций получены следующие показатели их качества при соответствующих способах формирования однородности и методиках отбора и анализа проб.

Максимальные отклонения содержания 1-го компонента  
(технические алмазы) в пробах

При ТРАДИЦИОННОМ СМЕШЕНИИ с остановкой агрегата для отбора проб		При НОНМИКСИНГЕ с непрерывным дискретным формированием (синтезом) однородности (показателей качества) функциональных единиц смеси (отрезных кругов)	
0-2 часа	2,4%	0-2 часа	0,3%
2-4 часа	0,8%	2-4 часа	0,4%
4-6 часов	2,7%	4-6 часов	0,5%

$$N_{y_{min}}^T = 1,6. N_{y_{max}}^T = 9,0.$$

Максимальные отклонения содержания 2-го компонента  
(оловянная связка) в пробах

При ТРАДИЦИОННОМ СМЕШЕНИИ с остановкой агрегата для отбора проб		При НОНМИКСИНГЕ с непрерывным дискретным формированием (синтезом) однородности (показателей качества) функциональных единиц смеси (отрезных кругов)	
0-2 часа	12%	0-2 часа	1,3%
2-4 часа	1,8%	2-4 часа	1,1%
4-6 часов	12,2%	4-6 часов	1,4%

$$N_{y_{min}}^T = 1,3. N_{y_{max}}^T = 11,1.$$

Максимальные отклонения содержания наполнителя  
(медный порошок) в пробах

При ТРАДИЦИОННОМ СМЕШЕНИИ с остановкой агрегата для отбора проб		При НОНМИКСИНГЕ с непрерывным дискретным формированием (синтезом) однородности (показателей качества) функциональных единиц смеси (отрезных кругов)	
0-2 часа	14,4%	0-2 часа	1%
2-4 часа	3,3%	2-4 часа	1,2%
4-6 часов	14,9%	4-6 часов	1,3%

$$N_{y_{min}}^T = 2,5. N_{y_{max}}^T = 14,9.$$

#### 4.3.4 Получение сбалансированных премиксов с соотношением компонентов до 1:100

При производстве гетерогенных композиций, используемых в качестве модифицирующих добавок к общему сбалансированному рациону питания животных предъявляются высокие требования к точности содержания компонентов, особенно тех, которые обладают токсичными или активными электро-химико-физическими и электромагнитными свойствами. Такие

компоненты как правило являются малосодержащимися и обеспечение их удовлетворительной (необходимой) концентрации традиционными методами смешения представляет определенную трудность [47,49,64,95].

При традиционном смешении данных компонентов, они как правило оказывают негативное влияние на однородность смеси и плохо поддаются анализу и управлению концентрацией (однородностью) внутри смесительного пространства машины. Для большинства рецептов премиксов получить необходимое качество композиций традиционными методами оказывается практически невозможно, тем более что соотношение компонентов в подобных продуктах достигают значений до 1:100 и выше [102,124,154].

Поэтому для проведенного эксперимента в качестве ключевых компонентов выбраны соответственно соли селена (токсичные вещества) и некоторые витаминно-минеральные добавки (химически активные вещества), в качестве наполнителя – карбонат кальция (мел). Ниже рассмотрены результаты экспериментальных опытов получения премиксов с соотношением компонентов в композиции до 1:100 [21,33,34].

При проведении первой части экспериментов по оценке качества премиксов, получаемых традиционным способом использован традиционный червячно-лопастной смеситель с рабочим объемом  $0,1 \text{ м}^3$  [149-155].

Зависимости концентрации ключевых компонентов и наполнителя от времени смешения, получаемые при стохастическом формировании представлены на рисунке 4.14, в таблице 4.11.

Для проведения второй части экспериментов по оценке качества премиксов, получаемых методом формирования управляемой однородности использован шестипозиционный роторный нонмиксер с коническими роторными питателями для формирования однородной структуры композиции внутри машины в единую фасовочную тару, что позволяет сохранять полученную однородность премикса при дальнейшей упаковке и транспортировке [44,90,91].

Концентрации ключевых компонентов и наполнителя, получаемые в результате формирования управляемой однородности композитной смеси, показаны на рисунке 4.15, в таблице 4.12.

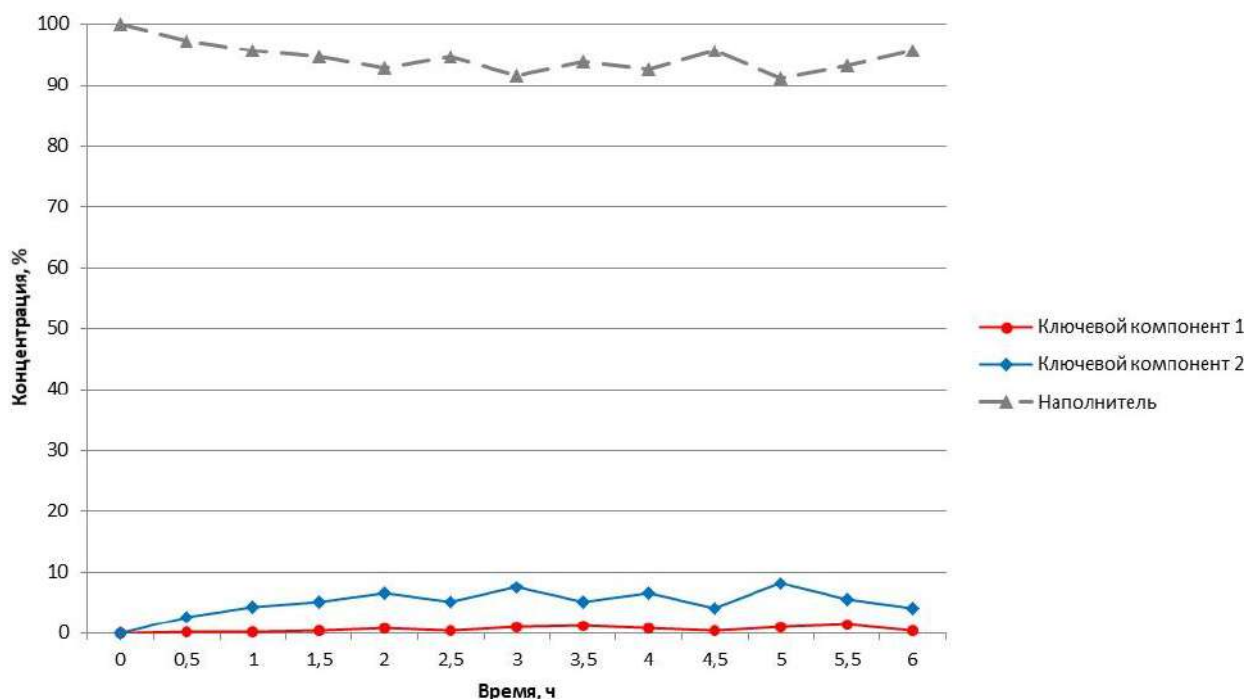


Рисунок 4.14 – Показатели качества премиксов при традиционном формировании однородности

Таблица 4.11

Время смешения, ч	Ключевой компонент 1	Ключевой компонент 2	Наполнитель
0	0	0	100
0,5	0,1	2,5	97,4
1	0,2	4,2	95,6
1,5	0,3	5	94,7
2	0,7	6,5	92,8
2,5	0,3	5	94,7
3	0,9	7,5	91,6
3,5	1,2	5	93,8
4	0,8	6,5	92,7
4,5	0,4	4	95,6
5	0,9	8	91,1
5,5	1,3	5,5	93,2
6	0,4	4	95,6



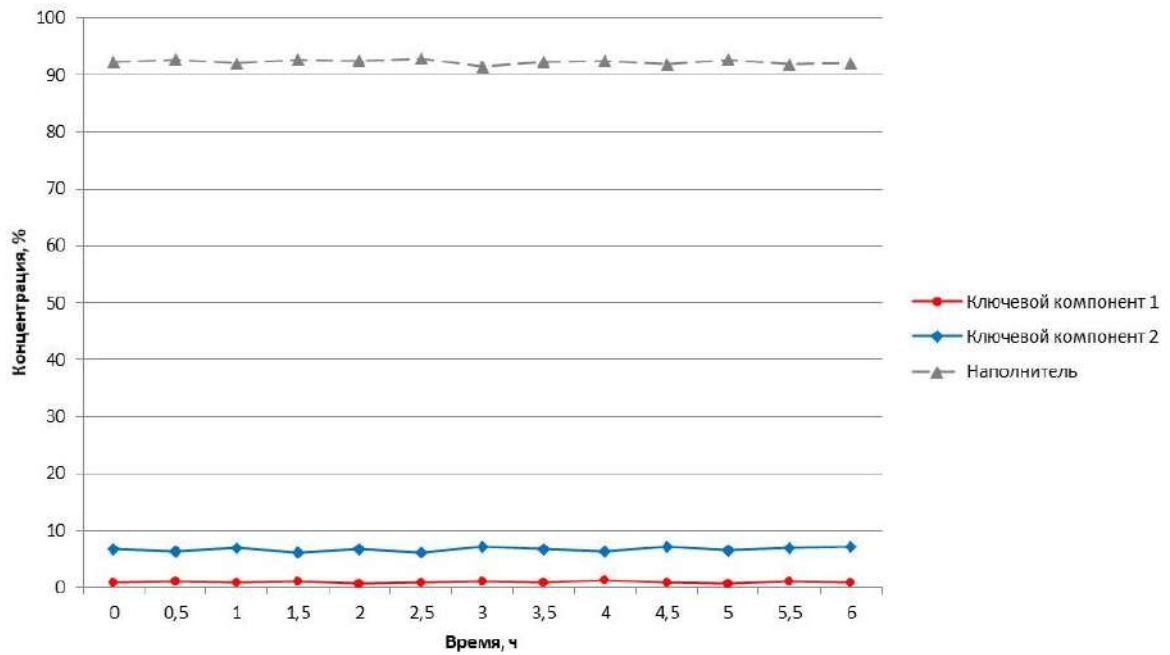


Рисунок 4.15 – Показатели качества премиксов при управляемом формировании однородности

Таблица 4.12

Время синтеза, ч	Ключевой компонент 1	Ключевой компонент 2	Наполнитель
0	0,9	6,8	92,3
0,5	1,1	6,3	92,6
1	0,9	7	92,1
1,5	1,2	6,2	92,6
2	0,8	6,7	92,5
2,5	1	6,1	92,9
3	1,2	7,3	91,5
3,5	0,9	6,8	92,3
4	1,2	6,4	92,4
4,5	1	7,1	91,9
5	0,8	6,5	92,7
5,5	1,2	6,9	91,9
6	0,9	7,1	92

В результате проведенных экспериментов для бетонных композиций получены следующие показатели их качества при соответствующих способах формирования однородности и методиках отбора и анализа проб [21].

Максимальные отклонения содержания 1-го компонента (соли селена) в пробах

При <b>ТРАДИЦИОННОМ СМЕШЕНИИ</b> с остановкой агрегата для отбора проб		При <b>НОНМИКСИНГЕ</b> с непрерывным дискретным формированием (синтезом) однородности (показателей качества) функциональных единиц смеси (композиции)	
0-2 часа	0,7%	0-2 часа	0,4%
2-4 часа	0,5%	2-4 часа	0,4%
4-6 часов	0,9%	4-6 часов	0,4%

$$N_{y_{min}}^T = 1,25. N_{y_{max}}^T = 2,25.$$

Максимальные отклонения содержания 2-го  
(минеральные добавки) компонента в пробах

При <b>ТРАДИЦИОННОМ СМЕШЕНИИ</b> с остановкой агрегата для отбора проб		При <b>НОНМИКСИНГЕ</b> с непрерывным дискретным формированием (синтезом) однородности (показателей качества) функциональных единиц смеси (композиции)	
0-2 часа	6,5%	0-2 часа	0,8%
2-4 часа	2,5%	2-4 часа	1,2%
4-6 часов	4%	4-6 часов	0,7%

$$N_{y_{min}}^T = 2,08. N_{y_{max}}^T = 9,29.$$

Максимальные отклонения содержания наполнителя  
(карбонат кальция) в пробах

При <b>ТРАДИЦИОННОМ СМЕШЕНИИ</b> с остановкой агрегата для отбора проб		При <b>НОНМИКСИНГЕ</b> с непрерывным дискретным формированием (синтезом) однородности (показателей качества) функциональных единиц смеси (композиции)	
0-2 часа	7,2%	0-2 часа	0,5%
2-4 часа	1,9%	2-4 часа	1,4%
4-6 часов	4,5%	4-6 часов	0,8%

$$N_{y_{min}}^T = 1,36. N_{y_{max}}^T = 14,4.$$

По графикам зависимостей концентрации от времени смешивания можно сделать вывод, что для традиционного стохастического смешения кривые для различных ключевых компонентов имеют различную форму и не имеют общих тенденций возрастания, убывания и пиков. Качественные показатели смесей имеют разбросы от номинального (необходимого) значения содержания ключевого компонента в пробах. А для управляемого (детерминированного) формирования смеси расхождения от номинального значения содержания ключевого компонента в пробах имеют значительно меньший разброс.

#### 4.4 Сравнение абсолютных и относительных показателей качества смесей и композитов, полученных при традиционном и управляемом формировании однородности

1. Сравнение значений отклонения концентраций смеси трубчатых длинномеров, полученной традиционным и управляемым формированием однородности, представлено на рисунке 4.16.

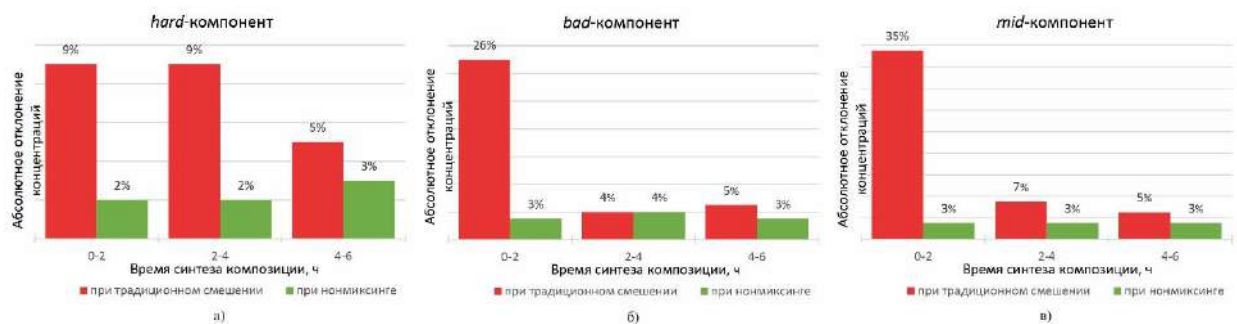


Рисунок 4.16 – Абсолютные значения максимальных отклонений содержания компонентов в пробах смеси трубчатых длинномеров с традиционным и управляемым формированием однородности:

а) 1-го компонента, б) 2-го компонента, в) наполнителя

По 1-му компоненту качество смеси улучшилось минимально в 1,7 раза, максимально – 4,5 раза.

По 2-му компоненту качество смеси улучшилось минимальное в 1,0 раза, максимально – 8,7 раза.

По наполнителю качество смеси улучшилось минимально в 1,7 раза, максимальное – 11,7 раза.

2. Сравнение значений отклонения концентраций смеси композитных бетонов, полученной традиционным и управляемым формированием однородности, представлено на рисунке 4.17.

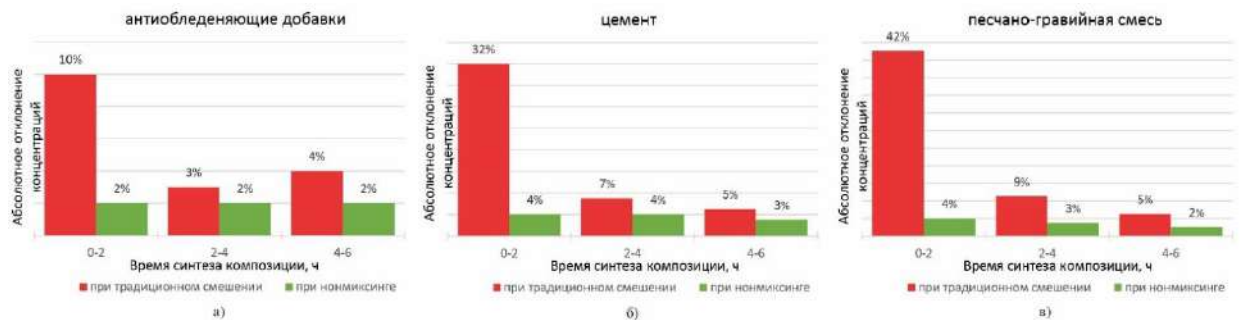


Рисунок 4.17 – Абсолютные значения максимальных отклонений содержания компонентов в пробах смеси композитных бетонов с традиционным и управляемым формированием однородности:

а) 1-го компонента, б) 2-го компонента, в) наполнителя

По 1-му компоненту качество смеси улучшилось минимально в 1,5 раза, максимально – 5,0 раза.

По 2-му компоненту качество смеси улучшилось минимальное в 1,25 раза, максимально – 10,7 раза.

По наполнителю качество смеси улучшилось минимально в 1,25 раза, максимальное – 21,0 раза.

3. Сравнение значений отклонения концентраций смеси композитных порошковых смесей для изготовления абразивного инструмента, полученной

традиционным и управляемым формированием однородности, представлено на рисунке 4.18.



Рисунок 4.18 – Абсолютные значения максимальных отклонений содержания компонентов в пробах композитных порошковых смесей для изготовления абразивного инструмента с традиционным и управляемым формированием однородности: а) 1-го компонента, б) 2-го компонента, в) наполнителя

По 1-му компоненту качество смеси улучшилось минимально в 1,6 раза, максимально – 9,0 раза.

По 2-му компоненту качество смеси улучшилось минимальное в 1,3 раза, максимально – 11,1 раза.

По наполнителю качество смеси улучшилось минимально в 2,5 раза, максимальное – 14,9 раза.

4. Сравнение значений отклонения концентраций смеси премиксов, полученной традиционным и управляемым формированием однородности, представлено на рисунке 4.19.

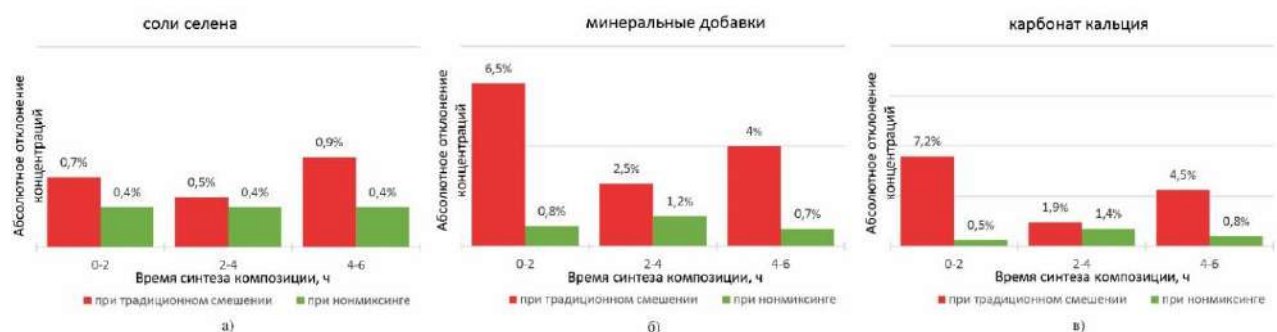


Рисунок 4.19 – Абсолютные значения максимальных отклонений содержания компонентов в пробах: а) 1-го компонента, б) 2-го компонента, в) наполнителя

По 1-му компоненту качество смеси улучшилось минимально в 1,25 раза, максимально – 2,25 раза.

По 2-му компоненту качество смеси улучшилось минимальное в 2,08 раза, максимально – 9,29 раза.

По наполнителю качество смеси улучшилось минимально в 1,36 раза, максимальное – 14,4 раза.

Обобщенные интегральные графики значений относительных отклонений содержания ключевых компонентов и наполнителя в пробах смеси, представленный на рисунке 4.20, наглядно показывает сравнение традиционного и управляемого формирования однородности композиций.

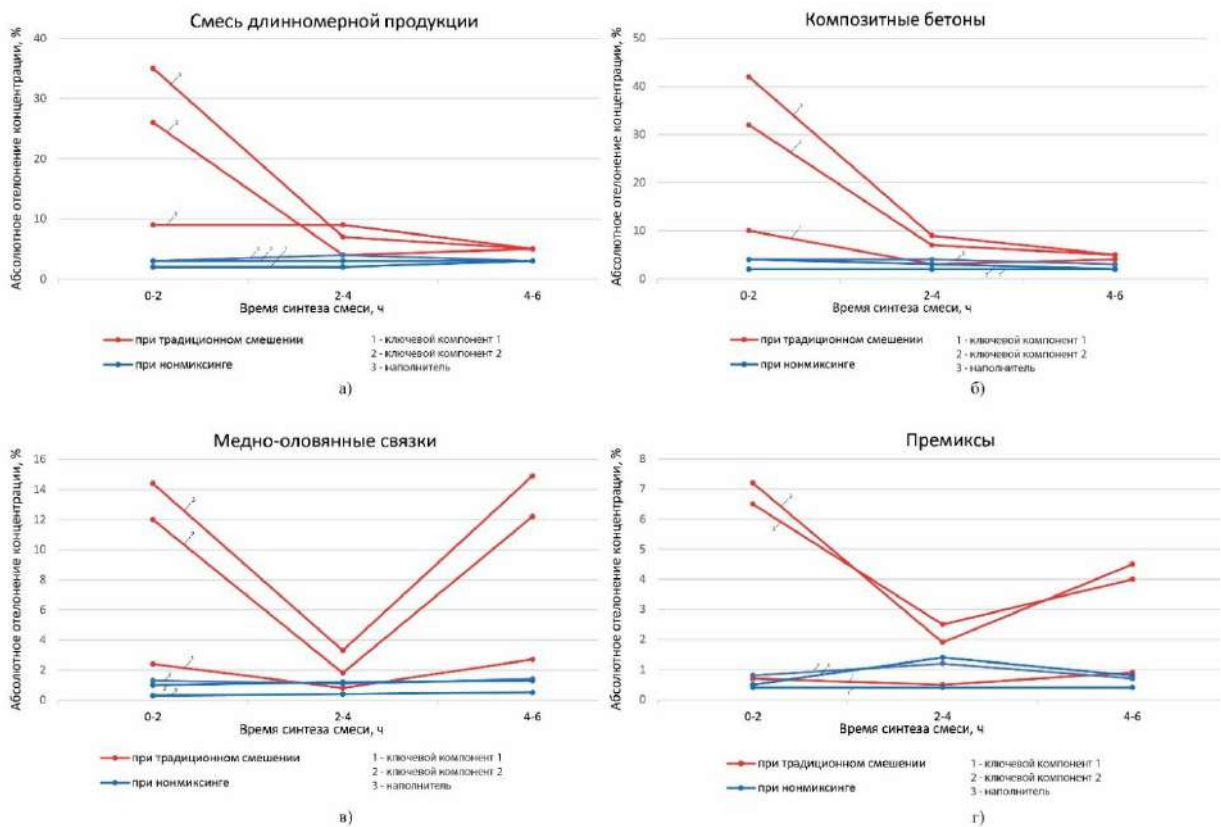


Рисунок 4.20 – Обобщенные интегральные графики значений относительных отклонений содержания компонентов в пробах смесей и композитов с традиционным и управляемым формированием однородности:  
 а) смесь длинномерной продукции, б) композитные бетоны,  
 в) медно-оловянные связки, г) премиксы

#### 4.5 Верификация разработанных критериев оценки качества гетерогенных композиций при экспериментальном исследовании управляемого формирования их однородности

Технологические преимущества нонмиксинга перед традиционными методами синтеза гетерогенных композиций показаны выше и полученные результаты практических экспериментов представлены на рисунке 4.16-4.20. Поэтому необходимо проанализировать, то есть провести верификацию соответствия и работоспособности разработанных критериев оценки качества композиций процессам нонмиксинга с результатами экспериментальных исследований этих процессов.

Для этого для каждого проведенного эксперимента, в соответствии с использованным способом организации потоков компонентов: 1, 2 и 4 эксперименты – дискретные потоки, 3 эксперимент – непрерывные потоки компонентов проведены теоретические (в соответствии критериальными зависимостями) и экспериментальные расчеты концентраций компонентов в зависимости по параметру времени синтеза композиции и проведен их сравнительный анализ (верификация).

1. Для верификации экспериментов проведено сравнение полученных теоретических (см. п. 2.1, 2.2, 3.2.1) и экспериментальных (см. п. 4.2.2, 4.3.1, 4.3.2, 4.3.4) данных для  $\xi$ -го компонента(ов) соответственно. Верификация соответственно будет произведена по зависимости **критерия** анализа и управления однородностью (показателями качества) композиций формируемых из **дискретных** потоков компонентов применительно к данной технологической задаче

$$p \left( \left| \frac{\mu_{(max)} - \mu_{(min)}}{k(N)} - m(\mu)_{(norm)} \right| \leq \delta_{\xi(norm)} \right) \geq p_{\xi(norm)} \Rightarrow \\ \Rightarrow 1,0(\text{событие\_для\_} k = N \text{_(не)состоялось}) \geq p_{\xi(norm)}, \quad (4.1)$$

где  $(\mu_{(max)} - \mu_{(min)})$  – разброс значений относительных концентраций  $\xi$ -го компонента,  $k(N)$  – число выборок эффективного использования, в которых

необходимо обеспечить гарантированный уровень показателей качества,  $m(\mu)_{(norm)}$  – относительное значение концентрации,  $\delta_{\xi(norm)}$  – нормированные точность содержания компонента по ГОСТ,  $p_{\xi(norm)}$  – доверительная вероятность получения заданных показателей качества.

В данном случае число  $N$  – минимальное число единичных синтезируемых доз смеси или композита, обуславливающее возможность формировать эффективную дозу композита для обеспечения нужного соотношения функционирования технологической системы – «производительность-качество» и наоборот [44].

2. Для верификации экспериментов проведено сравнение полученных теоретических (см. п. 2.3, 3.2.2) и экспериментальных (см. п. 4.2.1, 4.3.3, рисунок. 4.13, таблица 4.10) данных для следующих компонентов: технических алмазов, оловянной связки и медного порошка. Верификация соответственно будет произведена по зависимости **критерия** анализа и управления однородностью (показателями качества) композиций формируемых из **непрерывных** потоков компонентов

$$\begin{aligned} |V(T)_{(min,max)} - A_{*(norm)}T_{(current)}| \leq \Delta_{(norm)} \Rightarrow \\ |\dot{V}(T)_{(min,max)}| \leq \Delta_{(norm)}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

где  $V(T)_{(min,max)}$  – объем (масса) компонента оседаемого по времени за один или несколько технологических циклов,  $A_{*(norm)}$  – заданное значение концентрации компонента,  $T_{(current)}$  – текущее (анализируемое) время синтеза композиции,  $\Delta_{(norm)}$  – заданная точность содержания компонента.

Здесь

$$\dot{V}(T)_{(min,max)} \quad (4.3)$$

– первая производная выдаваемого дозатором объема или массы компонента по времени – практическая разница концентраций компонента за текущий (анализируемый) период времени, полученный на основе теоретических расчетов (п. 2.3.1, 3.2.2).



#### 4.5.1 Верификация разработанных критериев оценки качества гетерогенных композиций при экспериментальном исследовании управляемого формирования их однородности для дискретных потоков компонентов

1 эксперимент. По зависимости (3.28), (4.1) из данных результатов эксперимента, показанных на рисунках 4.8, 4.9, 4.16 и в таблицах 4.5 и 4.6, полученное расчетное отклонение концентраций от полученных по критерию

$$p\left(\left|\frac{\mu_k}{k} - m\right| \leq \delta_\xi\right) \geq p_\xi,$$

при значениях: доверительной вероятности  $p_\xi=0,95$  и точности содержания компонента  $\delta_\xi= 0,04...0,06$  для длинномеров [23,65] при соотношении компонентов в композиции а:б:в – 11:24:65, *гарантированно* для разработанного критерия  $m(\mu)_{(norm)} = 0,02$  и общего времени наблюдений – 6 часов:

а) для 1-го *hard*-компонента (сильный)

$$p\left(\left|\frac{0,13_{(max)} - 0,1_{(min)}}{1(\infty)} - 0,02_{(norm)}\right| = 0,01 \leq 0,02(0,04 \dots 0,06)\right) =$$

$$= 1,0 \geq 0,95(95\%) \Rightarrow 1,0(\text{событие\_для\_} N = 1; \infty\_состоялось) \geq 0,95$$

– верификация критерия подтверждена при N от 1;

б) для 2-го компонента *bad*-компонента (слабый)

$$p\left(\left|\frac{0,26_{(max)} - 0,21_{(min)}}{2(\infty)} - 0,02_{(norm)}\right| = 0,005 \leq 0,02(0,04...0,06)\right) =$$

$$= 1,0 \geq 0,95(95\%) \Rightarrow 1,0(\text{событие\_для\_} N = 2, \infty\_состоялось) \geq 0,95$$

– верификация критерия подтверждена при N от 2, то есть для заявленной высокой точности 0,02, необходимо скорректировать увеличение производительность машины в два раза. При нормированной точности 0,04...0,06 критерий верифицируется при N от 1. Таки образом осуществляется управление однородностью, и соответственно качеством эффективной выборки

использования композиции посредством изменения параметров и режимов работы генерирующей композит машины;

в) для наполнителя – *mid*-компонента (средний)

$$p \left( \left| \frac{0,68_{(max)} - 0,64_{(min)}}{1_{(\infty)}} - 0,02_{(norm)} \right| = 0,02 \leq 0,02(0,04 \dots 0,06) \right) =$$

$$= 1,0 \geq 0,95(95\%) \Rightarrow 1,0(\text{событие\_для\_} N = 1_{\text{состоялось}}) \geq 0,95$$

– верификация критерия при  $N$  от 1 подтверждена.

Таким образом при использовании разработанного *критерия анализа и управления однородностью гетерогенных композиций формируемых из дискретных потоков компонентов* возможна практическая корреляция (управление) параметрами и режимами работы нонмиксеров и однородности получаемых композиций при изменении скорости вращения роторов барабанных питателей в пределах обеспечения концентраций и минимального числа выборок эффективного использования  $N$ .

Это позволяет гибко и главное в допустимых пределах необходимого уровня качества, получаемых композиций управлять формированием их однородности, регулируя режимы работы дозаторов и нонмиксеров для обеспечения нужной (максимальной) производительности при обеспечении заданных соотношений компонентов, что подтверждает адекватность и работоспособность разработанного критерия для приведенного технологического процессов получения гетерогенных композиций.

*2 эксперимент.* По зависимости (3.28), (4.1) из данных результатов эксперимента, показанных на рисунках 4.10, 4.11, 4.17 и в таблицах 4.7 и 4.8, полученное расчетное отклонение концентраций от полученных по критерию

$$p \left( \left| \frac{\mu_k}{k} - m \right| \leq \delta_\xi \right) \geq p_\xi,$$

при значениях: доверительной вероятности  $p_{\xi}=0,95$  и точности содержания компонента  $\delta_{\xi}=0,6...0,1$  для композитных бетонов [20,25,38,81] при соотношении компонентов в композиции а:б:в – 10:38:52 (до 1:10), *гарантированно* для разработанного критерия  $m(\mu)_{(norm)}=0,02$  и общего времени наблюдений – 6 часов:

а) для 1-го компонента – антиобледеняющих добавок

$$p\left(\left|\frac{0,11_{(max)} - 0,08_{(min)}}{1(\infty)} - 0,02_{(norm)}\right| = 0,01 \leq 0,02(0,6...1,0)\right) =$$

$$= 1,0 \geq 0,95(95\%) \Rightarrow 1,0(\text{событие\_для\_} N = 1; \infty\_состоялось) \geq 0,95$$

– верификация критерия подтверждена при  $N$  от 1;

б) для 2-го компонента – цемента

$$p\left(\left|\frac{0,39_{(max)} - 0,34_{(min)}}{2(\infty)} - 0,02_{(norm)}\right| = 0,005 \leq 0,02(0,6...1,0)\right) =$$

$$= 1,0 \geq 0,95(95\%) \Rightarrow 1,0(\text{событие\_для\_} N = 2, \infty\_состоялось) \geq 0,95$$

– верификация критерия подтверждена при  $N$  от 2;

в) для наполнителя – песчано-гравийной смеси

$$p\left(\left|\frac{0,56_{(max)} - 0,52_{(min)}}{1(\infty)} - 0,02_{(norm)}\right| = 0,02 \leq 0,02(0,6...1,0)\right) =$$

$$= 1,0 \geq 0,95(95\%) \Rightarrow 1,0(\text{событие\_для\_} N = 1\_состоялось) \geq 0,95$$

– верификация критерия при  $N$  от 1 подтверждена.

4 эксперимент. По зависимости (3.28), (4.1) из данных результатов эксперимента, показанных на рисунке 4.14, 4.15, 4.19 и в таблицах 4.11, 4.12, полученное расчетное отклонение концентраций от полученных по критерию

$$p\left(\left|\frac{\mu_k}{k} - m\right| \leq \delta_{\xi}\right) \geq p_{\xi},$$

при значениях: доверительной вероятности  $p_{\xi}=0,95$  и точности содержания компонента  $\delta_{\xi}=0,5...0,1$  для премиксов [34,35,44,47,102,155] при соотношении

компонентов в композиции а:б:в – 1:7:92 (до 1:100), *гарантированно* для разработанного критерия  $m(\mu)_{(norm)} = 0,02$  и общего времени наблюдений – 6 часов:

а) для 1-го компонента – солей селена

$$p \left( \left| \frac{0,012_{(max)} - 0,08_{(min)}}{1(\infty)} - 0,02_{(norm)} \right| = 0,016 \leq 0,02(0,5 \dots 0,1) \right) = 1,0 \geq 0,95(95\%) \Rightarrow 1,0(\text{событие\_для\_} N = 1; \infty\_состоялось) \geq 0,95$$

– верификация критерия подтверждена при  $N$  от 1;

б) для 2-го компонента – минеральных добавок

$$p \left( \left| \frac{0,073_{(max)} - 0,061_{(min)}}{1(\infty)} - 0,02_{(norm)} \right| = 0,008 \leq 0,02(0,5 \dots 1,0) \right) = 1,0 \geq 0,95(95\%) \Rightarrow 1,0(\text{событие\_для\_} N = 1, \infty\_состоялось) \geq 0,95$$

– верификация критерия подтверждена при  $N$  от 1;

в) для наполнителя – карбоната кальция (мела)

$$p \left( \left| \frac{0,929_{(max)} - 0,915_{(min)}}{1(\infty)} - 0,02_{(norm)} \right| = 0,006 \leq 0,02(0,6 \dots 1,0) \right) = 1,0 \geq 0,95(95\%) \Rightarrow 1,0(\text{событие\_для\_} N = 1\_состоялось) \geq 0,95$$

– верификация критерия при  $N$  от 1 подтверждена.

#### **4.5.2 Верификация разработанных критериев оценки качества гетерогенных композиций при экспериментальном исследовании управляемого формирования их однородности для непрерывных потоков компонентов**

*3 эксперимент.* Для 6 (минимум) технологических циклов (оборотов ротора), что обусловлено необходимостью создания многослойной структуры отрезной части круга с целью получения наиболее упорядоченной структуры компонентов относительно друг друга и соответственно увеличения износостойкости всего изделия в целом.

По зависимостям (3.29) (4.2) и (4.3) для данных результатов эксперимента, показанных на рисунках 4.3, 4.4, 4.12, 4.13, 4.18 и в таблицах 4.1, 4.9, 4.10, полученное расчетное отклонение концентраций по критерию в соотношении компонентов а:б:в – 2%:12%:86% (1:6:43) от нормативного  $\Delta_{(norm)}$  [24]:

а) для *технических алмазов* (1-ый ключевой компонент)

при норме  $\Delta_{(norm)} = 2\%$  [24]:

за период: 0-2 часа

$$|1,8\% - 2,1\%| \leq 2\% \Rightarrow 0,003 \leq 0,02 - \text{критерий верифицирован,}$$

за период: 2-4 часа

$$|1,7\% - 2,2\%| \leq 2\% \Rightarrow 0,005 \leq 0,02 - \text{критерий верифицирован,}$$

за период: 4-6 часа

$$|1,7\% - 2,2\%| \leq 2\% \Rightarrow 0,005 \leq 0,02 - \text{критерий верифицирован;}$$

б) для *оловянной связки* (2-ой ключевой компонент)

при норме  $\Delta_{(norm)} = 4\%$  [24]:

за период: 0-2 часа

$$|12,7\% - 11,4\%| \leq 3\% \Rightarrow 0,013 \leq 0,04 - \text{критерий верифицирован,}$$

за период: 2-4 часа

$$|12,7\% - 11,8\%| \leq 3\% \Rightarrow 0,011 \leq 0,04 - \text{критерий верифицирован,}$$

за период: 4-6 часа

$$|13,0\% - 11,6\%| \leq 3\% \Rightarrow 0,014 \leq 0,04 - \text{критерий верифицирован;}$$

в) для *медного порошка* (наполнителя) при норме  $\Delta_{(norm)} = 3\%$  [24]:

за период: 0-2 часа

$$|86,5\% - 85,5\%| \leq 3\% \Rightarrow 0,01 \leq 0,03 - \text{критерий верифицирован;}$$

за период: 2-4 часа

$$|86,7\% - 85,5\%| \leq 3\% \Rightarrow 0,012 \leq 0,03 - \text{критерий верифицирован;}$$

за период: 4-6 часа

$$|86,4\% - 85,1\%| \leq 3\% \Rightarrow 0,013 \leq 0,03 - \text{критерий верифицирован.}$$

Во всех экспериментах максимальные отклонения концентраций компонентов не превысили 4% при допустимых 10%. Таким образом сходимость расчетных и экспериментальных результатов можно считать удовлетворительной.

#### 4.6 Выводы по главе

В разделе представлены четыре типа экспериментов наиболее презентабельно характеризующих специфику решаемых технологических задач. В качестве оборудования использовались – шнековые для непрерывных потоков и роторные для дискретных потоков компонентов дозаторы; традиционные – барабанные, червячно-лопастные, тарельчатые, ленточные смесители и новый класс машин для приготовления композиций с упорядоченной структурой – нонмиксеры.

В качестве компонентов использовались различные по своим физико-механическим и химическим свойствам материалы, используемые для приготовления композиций при производстве изделий специального назначения, огнеупоров, композитных бетонов, абразивного инструмента и премиксов.

После проведения экспериментов получены следующие результаты:

- соотношения компонентов при синтезе гетерогенных композиций обеспечивались на уровне до 1:100,

- все эксперименты проведены и их результаты проанализированы и подтверждены по нижнему пределу высокого и очень высокого качества отклонения концентрации в эффективной выборке гетерогенной композиции – 2%,

- получена сходимость результатов на уровне, не превышающем 4%,

- подтверждена адекватность и работоспособность разработанных критериев для приведенных технологических процессов получения гетерогенных композиций,

- показана возможность и методика управления формированием однородности композиций при изменении режимов работы дозаторов и

нонмиксеров для обеспечения нужной (максимальной) производительности при обеспечении заданных соотношений компонентов и высоких показателей качества получаемых гетерогенных композиций.

Процесс регулирования режимами работы машин для синтеза композиций целесообразно осуществлять в online-режиме с использованием АСУ на базе прикладного программного обеспечения, в том числе и разработанного [99].

В целом доказано, что разработанные и исследованные альтернативные традиционным критерии анализа, оценки и управления однородностью гетерогенных композиций в полной мере способны осуществлять метрологическое сопровождение практических всех технологий нонмиксинга, в том числе на ближнюю и среднюю перспективы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная научная задача совершенствования инструментария обеспечения качества гетерогенных смесей и композитов с управляемой однородностью, имеющая существенное значение для развития управления качеством продукции, стандартизации и организации производства, как отрасли знаний. В ходе решения поставленных в диссертационной работе задач были получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Разработана обобщенная концепция формирования управляемой однородности (качества) смесей и композитов, так как на основе исследования производственного опыта и анализа трудов отечественных и зарубежных исследователей в области управления качеством, установлено, что одними из основных факторов, оказывающих негативное влияние на качество гетерогенных смесей и композитных материалов являются стохастическое формирование их однородности (качества) и отсутствие возможности управления качеством, которые связаны со спецификой традиционных способов их производства.

Обосновано понятие «однородность» гетерогенной композиции как основной признак и параметр, определяющий показатели качества получаемой продукции. Соответственно разработан и представлен инструментарий использования концепции управления качеством гетерогенных композиций при производстве их на новом классе машин – нонмиксерах, нивелирующий недостатки существующих методик.

2. Разработаны математические модели процессов производства однородных смесей и композитов из дискретных и непрерывных потоков компонентов, которые отличаются от известных обеспечением возможности управления показателями их качества. Теоретические зависимости, полученные в результате данного моделирования, адаптируются через входящие показатели, а именно: физико-механические свойства компонентов, а также режимы и конструкции машин для синтеза композитов – на выходящие показатели качества смесей и композитов: обеспечиваемые концентрации компонентов и вероятность



обеспечения данных концентраций. Это позволяет на основе полученных моделей получать адаптированные критерии обеспечения качества композиций, на примере зависимостей (4.1) и (4.2), которые в виде ПО или других инженерных инструментов, например методик, могут быть использованы в условиях реального производства смесей и композитов с возможностью управления формированием их однородности (качества).

3. Разработаны критерии оценки качества гетерогенных композиций, синтезируемых из дискретных и непрерывных потоков компонентов, позволяющие обеспечивать управляемую их высокую однородность и качество. Критерии разработаны для двух различных по своей физической природе процессах формирования однородности композиций: синтезируемых их дискретных потоков компонентов и синтезируемых из непрерывных потоков компонентов. Критерии представляют собой логические зависимости между показателями качества композиций и параметрами работы оборудования для их синтеза. Основным отличием разработанных критериев от существующих является возможность учета некоторых режимных и конструктивных параметров оборудования, изменяя которые при производстве композиций можно напрямую управлять их качеством. В то время как большинство существующих критериев позволяют анализировать только лишь конечный полученный результат, без возможности какого-либо им управления. Разработанные зависимости построены с помощью инструментов статистики и математического анализа и ориентированы на обеспечение качества композиций на уровне доверительной вероятности 0,9 и выше, обеспечивая таким образом гарантированный уровень показателей качества продукции. Использование разработанных критериев в теоретическом приложении может позволить описывать не только процессы нонмиксинга, но и любые другие процессы, обеспечивающие детерминированное формирование однородности композитов.

4. С помощью разработанных критериев проведены четыре типа экспериментов, наиболее презентабельно характеризующих специфику решаемых производственных задач. В качестве оборудования использовались – шнековые

для непрерывных потоков и роторные для дискретных потоков компонентов дозаторы; традиционные – барабанные, червячно-лопастные, тарельчатые, ленточные смесители и новый класс машин для приготовления композиций с упорядоченной структурой – нонмиксеры. В качестве компонентов использовались различные по своим физико-механическим и химическим свойствам материалы, используемые для приготовления композиций при производстве: изделий специального назначения, огнеупоров, композитных бетонов, абразивного инструмента и премиксов.

Для *специальных изделий*, при относительном улучшении качества для двух ключевых компонентов и наполнителя от 1,0 до 11,7 раза, получена верификация критерия оценки качества композиции на уровне доверительной вероятности обеспечения заданного качества  $p_{\xi}=0,95$  и отклонения концентраций не превышающем  $\delta_{\xi}=0,04...0,06$  при соотношении компонентов до 1:10. Для *композитных бетонов* при относительном улучшении качества для двух ключевых компонентов и наполнителя от 1,25 до 21,0 раза, получена верификация критерия оценки качества композиции на уровне доверительной вероятности обеспечения заданного качества  $p_{\xi}=0,95$  и отклонения концентраций не превышающем  $\delta_{\xi}=0,1...0,2$  при соотношении компонентов до 1:10. Для *абразивного инструмента* при относительном улучшении качества для двух ключевых компонентов и наполнителя от 1,3 до 14,9 раза получена верификация критерия оценки качества композиции на уровне доверительной вероятности обеспечения заданного качества  $p_{\xi}=0,95$  и отклонения концентраций не превышающем  $\delta_{\xi}=0,02..0,04$  при соотношении компонентов до 1:50. Для *премиксов* при относительном улучшении качества для двух ключевых компонентов и наполнителя от 1,25 до 14,4 раза получена верификация критерия оценки качества композиции на уровне доверительной вероятности обеспечения заданного качества  $p_{\xi}=0,95$  и отклонения концентраций не превышающем  $\delta_{\xi}=0,05...0,1$  при соотношении компонентов до 1:100.

Все эксперименты проведены и их результаты проанализированы и подтверждены по нижнему пределу высокого и(или) очень высокого качества отклонения концентрации в эффективной выборке гетерогенной композиции – 2%. Получена сходимость результатов на уровне, не превышающем 4%. Подтверждена адекватность и работоспособность разработанных критериев для приведенных технологических процессов получения гетерогенных композиций. Показана возможность и методика управления формированием однородности композиций при изменении режимов работы дозаторов и нонмиксеров для обеспечения нужной (максимальной) производительности при обеспечении заданных соотношений компонентов и высоких показателей качества получаемых гетерогенных композиций.

В результате проведенных экспериментальных опытов доказана возможность управления качеством производимых гетерогенных композиций из компонентов различной физической структуры и свойств: штучных размером до 600 мм, кристаллических и пылевидных с размером фракций от 0,005 до 2...3 мм с соотношением в композиции от 1:10 до 1:100 и выше.

5. На основе проведенных экспериментальных исследований разработана обобщенная методика управления процессами формирования доз из дискретных и непрерывных потоков, различных по своим свойствам компонентов, позволяющая при ее использовании обеспечивать нужную производительность и качество получаемой продукции в условиях реальных производственных процессов. Проведена оптимизация выбора способов получения нужного количества и объема доз компонентов, обеспечивающие гарантированное содержание ключевого компонента(ов) (в исследовании до 2-х), в выборке гетерогенной композиции, которую они составляют. Таким образом, с помощью разработанной методики можно осуществлять метрологическое сопровождение производства смесей и композитов широкой номенклатуры.

6. Практическое применение разработанных критериев наиболее эффективно при создании и использовании прикладного программного обеспечения управления режимами работы машин синтеза композиций.

Целесообразно осуществлять этот процесс в online-режиме с использованием АСУ на базе, в том числе и разработанного ПО: свидетельство на программу для ЭВМ № 2023611457.

Практическая реализация результатов научных исследований осуществлена в ООО «Биохим-ТЛ» (премиксы), ООО «ГИПЕРИОН» и ООО «Аврора» (производство строительных смесей и строительство), что обеспечило повышение качества выпускаемых композиций и их конкурентоспособность по сравнению с продукцией и услугами других производителей на 15-30% и предполагает, в зависимости от вида производства, получение экономического эффекта от 0,8 до 4 млн. рублей в год.

В качестве основных **рекомендаций** для дальнейших исследований по данной проблематике следует указать:

1. Необходимость совершенствования существующих и разработки новых дозирующих устройств, входящих в структуру нонмиксеров с целью обеспечения максимально малых и точных дискретных и непрерывных потоков компонентов для синтеза гетерогенных композиций наиболее высокого качества и упорядоченной однородности.

2. Совершенствование и использование методов метрологического сопровождения концепции управляемой однородности, включая создание нового программного обеспечения и использование САУ.

В качестве наиболее важных **перспектив** дальнейшего развития научно-технических приложений нонмиксинга и его метрологического сопровождения можно выделить два основных направления:

1. Совершенствование существующих и создание новых конструкций нонмиксеров, использующих различные физико-механические, химические, электромагнитные и другие способы создания упорядоченной структуры гетерогенных композиций.

2. Совершенствование разработанного и построение частного критериального обоснования методов концепции управляемой однородности для решения конкретных технологических задач.

Результаты исследования традиционных методов производства, контроля и управления качеством гетерогенных композиций в большинстве случаев можно рассматривать как нивелирующие технологии в общем понимании этого термина. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований осуществлен *качественный переход* от традиционных методов производства и контроля гетерогенных композиций к альтернативным, разработанным и исследованным в данной работе, позволяющим получать уровень качества композиций на порядок превышающий, получаемый при традиционных методах производства, а также, что особенно важно, обеспечивать возможность текущего контроля и управления однородностью, а следовательно и показателями качества получаемых композиций [14,37,40,44,46,50,55,58,59,63,67,68,75,78,83,90,93,96,97,101,147-157].

Разработанные и представленные в исследовании критерии анализа, оценки и управления качеством гетерогенных композиций в полной мере способны осуществлять метрологическое сопровождение практических всех технологий нонмиксинга, в том числе на ближнюю и среднюю перспективы.

Представленные в работе теоретические и экспериментальные разработки позволяют утверждать, что теория и практика формирования управляемой однородности гетерогенных композиций является на сегодняшний день одним из наиболее перспективных направлений в развитии профильных технологий и производств.

## СПИСОК ТЕРМИНОВ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

**Композиционный материал или композитный материал (композит)** – многокомпонентный материал, изготовленный (человеком или природой) из двух или более компонентов с существенно различными физическими и/или химическими свойствами, которые, в сочетании, приводят к появлению нового материала с характеристиками, отличными от характеристик отдельных компонентов и не являющимися простой их суперпозицией. В составе композита принято выделять матрицу/матрицы и наполнитель/наполнители, последние выполняют функцию армирования (по аналогии с арматурой в таком композиционном строительном материале, как железобетон).

**Концепция управляемой однородности** – комплекс технологических мероприятий метрологического сопровождения производства гетерогенных композиций различного применения, направленный на обеспечение их упорядоченной структуры, и позволяющий получать продукцию с заданным уровнем показателей качества.

**Прémикс** (от лат. Prae – вперёд, предварительно и лат. misceo — смешиваю) — технологическое понятие, означающее предварительно смешанные сухие компоненты, дозируемые в микроколичествах. Премиксы применяются в технологических процессах, где производится сухое смешивание компонентов для решения проблемы неравномерности смешивания. Области использования премиксов — фармацевтическая, пищевая, комбикормовая, резинотехническая, полимерная и др. промышленность.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Александровский, А.А. Исследование процесса смешения и разработка аппаратуры для приготовления композиций, содержащих твердую фазу: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.А. Александровский. – Казань, 1976. – 48 с.
2. Аллахвердиева, Х.В. Физико-механические свойства композиционных материалов на основе меди и полиолефинов / Х.В. Аллахвердиева // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». 2020. – Т. 63. – № 10. – С. 71-77. DOI: 10.6060/Doi 20206310.6251.
3. Альшиблави, К.А. Получение малослойного графена способом жидкофазной сдвиговой эксфолиации / К.А. Альшиблави, В.Ф. Першин, А.А. Баранов, Т.В. Пасько // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2019. – Т. 25. № 1. – С. 143-154.
4. Анциферов, С.И. Усовершенствованная конструкция брони подвижного конуса в конусной дробилке для горнорудной промышленности / С.И. Анциферов, Е.А. Сычев, А.В. Карачевцева, А.А. Обернихин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12–2. – С. 17-33.
5. Анциферов, С.И. Повышение эффективности процесса смешивания за счет совершенствования конструкции планетарного смесителя: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Анциферов Сергей Игоревич. – Белгород, 2017. – 187 с.
6. Аристов, О.В. Управление качеством / О.В. Аристов. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 240 с.
7. Бакин, М.Н. Совершенствование процесса смешивания сыпучих материалов в новом аппарате с подвижной лентой: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Бакин Михаил Николаевич. – Ярославль, 2014. – 179 с.
8. Балкин, А. Динамический анализ гранулометрического состава / А. Балкин // Наноиндустрия. – 2013. – № 5. – С. 36-41.

9. Баранцева, Е.А. Моделирование и оптимизация процессов смешивания сыпучих материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / Баранцева, Елена Александровна. – Иваново, 2010. – 34 с.
10. Бородачев, Н.А. Анализ качества и точности производства / Н.А. Бородачев. – М: Машгиз, 1946. – 249 с.
11. Бородулин, Д.М. Повышение эффективности процесса смешивания при получении комбинированных продуктов в смесительных агрегатах центробежного типа: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12 / Бородулин Дмитрий Михайлович. – Кемерово, 2013. – 39 с.
12. Васильев, В.В. Механика конструкций из композиционных материалов / В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
13. Васин, С.А. Приготовление смесей гетерогенных компонентов и сред при детерминированном формировании их однородности для создания новых композитных материалов / С.А. Васин, А.В. Евсеев, А.А. Маликов, И.А. Юраскова // Станкоинструмент. – 2023. – Вып. 3. – С. 52-57. DOI: 10.22184/2499-9407.2023.32.3.52.57.
14. Васин, С.А. Управление качеством некоторых композитных и гетерогенных материалов модификацией наноконпонентами / С.А. Васин, А.В. Евсеев, В.Ф. Першин, И.А. Юраскова // Вестник РГУПС. Машиностроение. – 2023. Вып. 2. – С. 139-145. DOI: 10.46973/0201-727X\_2023\_2\_139.
15. Вдовин, К.Н. Шлакообразующие смеси для непрерывной разливки стали / К.Н. Вдовин, А.А. Ряхов, А.Б. Великий // Теория и технология металлургического производства. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2017. – С. 9-13.
16. Верлока, И.И. Современные гравитационные устройства непрерывного действия для смешивания сыпучих компонентов / И.И. Верлока, А.Б. Капанова, А.Е. Лебедев // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4.
17. Волков, М.В. Метод расчета процесса смешивания сыпучих материалов в новом аппарате с открытой рабочей камерой: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Волков Максим Витальевич. – Ярославль, 2014. – 138 с.



18. Воловельская, С.Н. Нелинейная корреляция и регрессия / С.Н. Воловельская. – Киев: Техника, 1971. – 216 с.
19. Вострокнутов, Е.Г. Переработка каучуков и резиновых смесей (реологические основы, технология, оборудование) / Е.Г. Вострокнутов, М.И. Новиков, В.И. Новиков, Н.В. Прозоровская. – М.: Химия, 1980. – 280 с.
20. Глобин, А.Н. Дозирующие устройства: монография / А.Н. Глобин. – Саратов: Вузовское образование, 2017. – 344 с. – ISBN 978-5-906172-13-6.
21. ГОСТ 13496.0-2016. Комбикорма, комбикормовое сырье. Методы отбора проб. – М.: Стандартинформ, 2016. – 14 с.
22. ГОСТ 20.39.108-85. Комплексная система общих технических требований. Требования по эргономике, обитаемости и технической эстетике. Номенклатура и порядок выбора. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 18 с.
23. ГОСТ 27879-88. Линии автоматические роторные и роторно-конвейерные. Общие технические требования. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 8 с.
24. ГОСТ 30513-97. Инструмент абразивный и алмазный. Методы испытаний на безопасность. – М.: Стандартинформ, 2008. – 4 с.
25. ГОСТ 30515-2013. Цементы. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019. – 38 с.
26. ГОСТ 4761-91. Ферротитан. Технические требования и условия поставки. – М.: Стандартинформ, 2007. – 7 с.
27. ГОСТ 4960-75. Порошок медный электролитический. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 9 с.
28. ГОСТ 8.579-2002. Требования к количеству фасованных товаров в упаковках любого вида при их производстве, расфасовке, продаже и импорте. – М.: Стандартинформ, 2008. – 8 с.
29. ГОСТ 8032-89. Предпочтительные числа и ряды предпочтительных чисел. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 18 с.

30. ГОСТ 8253-79. Мел химически осажденный. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 30 с.
31. ГОСТ 9231-80. Смесители лопастные двухвальные. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2002. – 6 с.
32. ГОСТ EN 13389-2013. Машины и оборудование для пищевой промышленности. Смесители с горизонтальными валами. Требования по безопасности и гигиене. – М.: Стандартиформ, 2014. – 32 с.
33. ГОСТ EN 454-2013. Машины и оборудование для пищевой промышленности. Смесители планетарные. Требования по безопасности и гигиене. – М.: Стандартиформ, 2014. – 60 с.
34. ГОСТ Р 51095-97. Премиксы. Технические условия. – М.: Госстандарт России, 1997. – 134 с.
35. ГОСТ Р 52356-2005. Премиксы. Номенклатура показателей. – М.: Стандартиформ, 2020. – 6 с.
36. ГОСТ Р 54425-2011. Машины и оборудование для пищевой промышленности. Смесители лопастные. Требования по безопасности и гигиене. – М.: Стандартиформ, 2013. – 32 с.
37. ГОСТ Р 56787-2015. Композиты полимерные. Неразрушающий контроль. – М.: Стандартиформ, 2016. – 67 с.
38. ГОСТ Р 58407.4-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные. Методы отбора проб. – М.: Стандартиформ, 2020. – 8 с.
39. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Стандартиформ, 2015. – 49 с.
40. Гродзенский, С.Я. Управление качеством / С.Я. Гродзенский. – М.: Проспект, 2018. – 320 с.
41. Деева, В.С., Анализ дозаторов потока неоднородных сыпучих сред / В.С. Деева, А.Е. Романишин, С.М. Слободян // Вестник АГАУ. – 2015. № 8. – С. 135-139.
42. Домкин, К.И. Физические основы измерения размера частиц / К.И. Домкин,

- В.А. Трусов, А.М. Гусев // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2011. – С. 131-138.
43. Евсеев, А.В. Нонмиксинг / А.В. Евсеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – Вып.9. – С.27-36.
44. Евсеев, А.В. Теория и оборудование детерминированного формирования однородности гетерогенных смесей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.13 / Евсеев Алексей Владимирович. – Тула, 2021. – 297 с.
45. Евсеев, А.В. Экспериментальная проверка математической модели детерминированного формирования однородности смеси для алмазного инструмента / А.В. Евсеев, М.С. Парамонова, В.В. Прейс, А.В. Лобанов // Цветные металлы. – 2019. – №1 (913). – С. 78-87. Doi: 10.17580/tsm.2019.01.12.
46. Евсеев, А.В. Однородность как качество гетерогенной смеси / А.В. Евсеев, И.А. Юраскова // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф. (Россия, Омск, 15-18 марта 2023 г.) / М-во образования Ом. обл. [и др.] ; редкол.: В. А. Лихолобов [и др.]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2023. – С. 104-105.
47. Жданова, Н.В. Применение ферромагнитных микротрейсеров как индикаторов определения качества однородности лечебных кормов, комбикормов и премиксов / Н.В. Жданова // Техника и технологии в животноводстве. – 2018. – С. 123-127.
48. Зегдинидзе, И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зегдинидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
49. Зырянов, Д.А. Повышение качества смешивания комбикормов оптимизацией конструктивно-технологических параметров горизонтального смесителя с ленточным шнеком: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Зырянов Дмитрий Алексеевич. – Киров, 2021. – 24 с.
50. Исикава, К. Японские методы управления качеством / К. Исикава. – М:

- Экономика, 1988. – 199 с.
51. Капранова, А.Б. Деаэрация сыпучих сред в совмещенных со смешением процессах: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 05.17.08 / Капранова Анна Борисовна. – Иваново, 2009. – 33 с.
  52. Капранова, А.Б. Моделирование критерия качества смеси в объеме барабанно-ленточного устройства / А.Б. Капранова, М.Н. Бакин, И.И. Верлока // Хим. и нефтегаз. машиностроение. – 2018. – № 5. – С. 3-9.
  53. Капранова, А.Б. Способы описания движения твердых дисперсных сред в различных плоскостях для сечений смесительного барабана / А.Б. Капранова, М.Н. Бакин, И.И. Верлока, А. И. Зайцев // Вестник Тамб. гос.техн. унта. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 296-304.
  54. Капранова, А.Б. Стохастическое описание процесса формирования потоков сыпучих компонентов в аппаратах со щеточными элементами / А.Б. Капранова, И. И. Верлока // Теор. основы хим. технологии. – 2018. – Т. 53, № 5. – С. 1-15.
  55. Кербер, М.Л. Разработка физико-химических основ эффективных методов получения композиционных материалов: автореф. дис. ... д-ра. хим. наук / Кербер Михаил Леонидович. – Москва, 1981. – 34 с.
  56. Кербер, М.Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии / М.Л. Кербер. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
  57. Китанина, Т.И. Некоторые аспекты формирования качества гетерогенных смесей и компоновок новых технических решений нонмиксеров для их производства / Т.И. Китанина, А.А. Лосева, И.А. Юраскова // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова [Электронный ресурс]: Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – Ч. 12. – С. 182-186.
  58. Клусов, И.А. Проектирование роторных машин и линий / И.А. Клусов. – М: Машиностроение, 1990, – 316 с.

59. Кольман-Иванов, Э.Э. Машины-автоматы химических производств / Э.Э. Кольман-Иванов. – М.: Машиностроение, 1972.
60. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. // М: Наука, 1968. – 720 с.
61. Коробчук, М.В. Вибрационное смешивание дисперсных материалов при наложении нелинейных колебаний: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Коробчук Максим Васильевич. – Санкт-Петербург, 2012. – 20 с.
62. Коробчук, М.В. Обзор современных вибрационных смесителей сыпучих материалов и тенденции их развития / М.В. Коробчук, А.Н. Веригин // Южно-сибирский научный вестник. – 2020. – № 4. – С. 32-45.
63. Кошкин, Л.Н. К вопросу о классификации технологических процессов и рабочих машин / Л.Н. Кошкин. – Литейное производство. – 1953. – № 4.
64. Краснов, И.Н. Производство комбикормов в условиях личных подсобных и фермерских хозяйств: монография / И.Н. Краснов, В.М. Филин, А.Н. Глобин, Е.А. Ладыгин. – зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2014. – 228 с.
65. Красновский, А.Н. Разработка методов, технологий и оборудования для непрерывного формования длинномерных изделий из композиционных материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Красновский Александр Николаевич. – Москва, 2013. – 41 с.
66. Ластовцев, А.М. О критерии эффективности процесса смешения твёрдых тел / А.М. Ластовцев // Тезисы докладов НТК. – МИХМ. – 1950. – №7.
67. Лукаш, А.Н. Развитие технологий и оборудования для приготовления смесей сыпучих материалов / А.Н. Лукаш, А.В. Евсеев, А.В. Чувпило // Тульского государственного университета. – 2000. – Вып. 5. – С. 218-224.
68. Макаров, Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю.И. Макаров. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
69. Макаров, Ю.И. Процессы и аппараты химической техники. Системно-информационный подход. – М.: МИХМ, 1977. – С.143-148.
70. Макаров, Ю.И. Основы расчета процессов смешения сыпучих материалов. Исследование и разработка смесительных аппаратов: автореф. дис. ... д-ра

- техн. наук / Макаров Юрий Иванович. – Москва, 1975. – 35 с.
71. Мак-Келви, Д.М. Переработка полимеров / Перевод с англ. Ю.В. Зеленева. – Москва: Химия, 1965. – 442 с.
  72. Мокрушин, В.В. Размерные факторы в анализе качества перемешивания порошковых механических смесей / В.В. Мокрушин, А.Ю. Постников, А.А. Потехин, П.Г. Бережко, И.А. Царева, О.Ю. Юнчина // Молодежь в науке: сборник докладов 16-й научно-технической конференции. – 2018. – С. 98-103.
  73. Налимов, В.В. Теория эксперимента / В.В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 208 с.
  74. Николаев, А.Ф. Технология полимерных материалов: учебное пособие / А.Ф. Николаев, В.К. Крыжановский. – Санкт-Петербург, 2011. – 536 с.
  75. Окрепилов, В.В. Управление качеством / В.В. Окрепилов. – М.: Экономика, 1998. – 639 с.
  76. ОСТ 26-01-526-72. Смесители периодического действия. Типы и основные параметры. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 60 с.
  77. ОСТ 26-01-147-89. Аппараты сушильные с вращающимися барабанами. Общие технические требования. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 32 с.
  78. Патент 2271243 РФ. Способ смешения сыпучих компонентов и устройство для его реализации / А.Н. Лукаш, А.В. Евсеев, Т.А. Овчинникова, К.В. Власов, О.В. Карпухина. Оpubл. 10.03.06. Бюл. №7.
  79. Патент 2309841 РФ. Способ приготовления сухой строительной смеси / В.И. Трофимов, В.Е. Лебедев. Оpubл. 10.11.07.
  80. Патент 2343457 РФ. Способ определения качества смеси сыпучих материалов / Ткачев А.Г., Баранов А.А., Меметов Н.Р., Пасько А.А., Пасько Т.В., Шубин И.Н., Блинов С.В., Авдеева А.В. Оpubл. 10.01.2009, Бюл. № 1.
  81. Патент 2363573 РФ. Устройство для приготовления сухой строительной смеси / В.И. Трофимов, М.А. Смирнов, В.Е. Лебедев, А.А. Чугреев, И.С. Калинин. Оpubл. 10.08.09. Бюл. № 22.

82. Патент 2406563 РФ. Смеситель наночастиц с сыпучими материалами / Шелудяков Е.П. Оpubл. 20.12.2010. Бюл. №35.
83. Патент 2542241 РФ. Способ непрерывного приготовления многокомпонентных смесей сыпучих материалов / Селиванов Ю.Т., Першин В.Ф., Поляков Б.Е. Оpubл. 14.10.2013.
84. Патент 2586126 РФ. Смеситель сыпучих материалов гравитационного типа / А.И. Зайцев и др. Оpubл. 10.06.2016, Бюл. № 16.
85. Патент 2620387 РФ. Способ определения коэффициента неоднородности смеси трудноразделимых сыпучих материалов / А.И. Зайцев и др. Оpubл. 25.05.2017, Бюл. № 15.
86. Патент 2621225 РФ. Смеситель сыпучих материалов гравитационного типа / А.Е. Лебедев и др. Оpubл. 01.06.2017, Бюл. № 16.
87. Патент 2656319 РФ. Способ смешения сыпучих материалов и автоматическое устройство для его осуществления / Фомин А.Н. Оpubл. 04.06.2018. Бюл. №16.
88. Патент 2690539 РФ. Способ исследования качества смеси компонентов, различающихся по цвету / Таршис М.Ю., Черпицкий С.Н., Королев Л.В., Капранова А.Б. Оpubл. 04.06.2019. Бюл. № 16.
89. Патент 2704192 РФ. Компактный дозатор-смеситель сыпучих материалов / Костюченко М.Н. Оpubл. 24.10.2019. Бюл. №30.
90. Патент 2707998 РФ. Способ получения смеси из сыпучих компонентов и устройство для его осуществления / А.В. Евсеев. Оpubл. 03.12.19. Бюл. №34.
91. Патент 2708780 РФ. Роторный питатель для сыпучего материала / А.В. Евсеев. Оpubл. 11.12.19. Бюл. №35.
92. Патент РФ № 2737925. Способ получения графеносодержащих суспензий эксфолиацией графита и устройство для его реализации / Першин В.Ф. Оpubл. 04.12.2020. Бюл. №34.
93. Патент РФ №2749267. Способ для получения смеси из трубчатых компонентов и устройство для его реализации / А.В. Евсеев. Оpubл.

- 07.06.21. Бюл. №16.
94. Першин, В.Ф. Двухстадийное непрерывное дозирование при производстве и использовании углеродных наноматериалов / В.Ф. Першин, А.М. Воробьев, В.М. Нечаев и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018. №6. – С.12-14.
  95. Писаренко, П.В. Применение ферромагнитных микротрейсеров как индикаторов качества однородности комбикормов в сельском хозяйстве / П.В. Писаренко, В.Е. Крикунова, Т.В. Сахно, О.А. Крикунов, Н.Н. Барашков // Вестник Курганской ГСХА. – 2016. – С. 50-54.
  96. Плинер, Ю.А. Оценка качества смешения частично упорядоченных смесей / Ю.А. Плинер, Л.В. Василевская. – М.: Металлургия. – 1975.
  97. РД РТМ 26-01-129-80. Машины для переработки сыпучих материалов. Методы выбора оптимального типа питателей, смесителей и измельчителей. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 12 с.
  98. Рогинский, Г.А. Дозирование сыпучих материалов / Г.А. Рогинский. – М., Химия, 1978. – 176 с.
  99. Свидетельство № 2023611457. Программа расчёта показателей качества смесей и композитов на основе диаграммы Парето / Евсеев А.В., Юраскова И.А. и др. Дата рег. 19.01.2023. Бюл. № 1.
  100. Смолин, Д.О. Разработка экспресс-метода определения качества смеси компонентов, различающихся по цвету / Д.О. Смолин, О.В. Дёмин, В.Ф. Першин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – С. 849-855.
  101. Сокольчик, П.Ю. Прогноз и управление качеством гетерогенных сыпучих смесей / П.Ю. Сокольчик, С.И. Сташков, М.В. Малимон // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – Пермь, 2013. – С. 64-83.
  102. Солнцев, К.М. Производство и использование премиксов / К.М. Солнцев, С.С. Васильченко, В.А. Крохина и др. // Л.: Колос, 1980. – 288 с.



103. Солонин, И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – М.: «Машиностроение», 1972. – 216 с.
104. Солонин, И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – М., «Машиностроение», 1972. – 216 с.
105. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками / Ф. Стренк. – Пер. с польск. под ред. Щупляка И.А. – Л., «Химия», 1975. – 384 с.
106. Тимонин, А.С. Машины и аппараты химических производств: Учебное пособие для вузов / А.С. Тимонин, Б.Г. Балдин, В.Я. Борщев, Ю.И. Гусев и др.; под общей редакцией А.С. Тимонина. – Калуга: Издательство Н.Ф. Бочкаревой, 2008. – 872 с.
107. Указ Президента Российской Федерации от 21.07.2020 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года».
108. Фадин, Ю.М. Применение пневматических смесителей в строительстве / Ю.М. Фадин, О.М. Шеметова // Механизация и автоматизация строительства. – 2020. – С. 250-254.
109. Феллер, У. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. – М. Мир, 1984.
110. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. – Изд-во Лань. – 2017. – Т.1. – С. 417-440.
111. Хальд, А. Математическая статистика с техническими приложениями / А. Хальд. – М.: Изд. Иностран. лит., 1956. – 664 с.
112. Хинт, Й.А. Дезинтеграторный способ изготовления силикатных и силикальцитных изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Й.А. Хинт. – Москва, 1952. – 14 с.
113. Черпицкий, С.Н. Разработка эффективных методов и критериев оценки качества смешивания сыпучих материалов / С.Н. Черпицкий, М.Ю. Таршис, Л.В. Королев // Современные задачи инженерных наук. – 2017. – С. 198-200.

114. Чувпило, А.В. Новое в теории и технике приготовления порошковых смесей / А.В. Чувпило. – ВНИИЭМ. –1964.
115. Чураков С.В. Совершенствование технологического комплекса оборудования для изготовления порошковой проволоки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Чураков, Сергей Витальевич. – Тула, 2004. – 227 с.
116. Шаргородский, А.М. Подготовка и смешение композиций / А.М. Шаргородский, Ю.М. Журкин, В.В. Богданов // Л., «Химия», 1973. – 80 с.
117. Юраскова, И.А. Классификация способов приготовления гетерогенных смесей и оборудование для их реализации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 10. – С. 482-485. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-10-482-485.
118. Юраскова, И.А. Повышение качества смесей и композитов, сформированных дискретными дозаторами конвейерного нонмиксера // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Вып. 5. – С. 541-543. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-541-542.
119. Юраскова, И.А. Применение некоторых принципов Total Quality Management для управления качеством гетерогенных смесей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Вып. 3. – С. 272-274. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-3-272-274.
120. Юраскова, И.А. Разработка оборудования для приготовления сыпучих смесей заданного качества при детерминированном формировании их однородности // Инновационные наукоемкие и информационные технологии: доклады студентов, аспирантов, молодых ученых на науч.-технич. конференции. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2023.– С. 9-11.
121. Юраскова, И.А. Некоторые аспекты управления качеством гетерогенных смесей, получаемых на нонмиксерах / И.А. Юраскова, А.В. Евсеев // IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» 18-20 апреля 2023 г.: сборник докладов. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2023. – С. 335-337.

122. Юраскова, И.А. Регрессионная математическая модель работы конических роторных дозаторов гетерогенных компонентов для управления качеством смесей, получаемых на нонмиксерах / И.А. Юраскова, А.В. Евсеев // Семьдесят шестая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием. 19-20 апреля 2023 г., Ярославль: сб. материалов конф. В 3 ч. Ч. 2. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2023. – Текст: электронный. – С. 120-124.
123. AC 21-26. Quality Control for the Manufacture of Composite Structures. – AIR-200. – 2010.
124. Antsiferov, V.N. Features of sintering processes using nano-sized carbide powders (scientific review) / V.N. Antsiferov, I.V. Antsiferova // Bulletin of PNRPU. Engineering, materials science. – 2015. – V. 17, No. 2. – pp. 66-77.
125. Arratia, P.E., Duong Nhat-hang, Muzzio F.J., Godbole P., Reynolds S. A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle Tote blender via DEM simulations / P.E. Arratia, Nhat-hang Duong, F.J. Muzzio, P. Godbole, S. Reynolds // Powder Technology. – 2006. – Vol. 164. – pp. 50-57.
126. Evseev, A.V. Formation of a mixture with the specified quality characteristics from the available small batches of multicomponent mixtures, provided that the total batch of the largest volume is created / A.V. Evseev, A.A. Alekseev, G.V. Kasatkin, N.E. Proskuriakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021, 1901(1), 012007.
127. Fan, L.T. Stochastic diffusion model of no ideal mixing in horizontal drum mixer / L.T. Fan, S.H. Shin // Chem. Eng. Sci. – 1979. – v. 34, № 6, – pp. 811-820.
128. Fawaz, Z. Quality control and testing methods for advanced composite materials in aerospace engineering / Z. Fawaz // Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering. – 2016. – pp. 429-451.
129. Geier, M.H. Quality Handbook for Composite Materials / M.H. Geier // Springer Dordrecht. 1994. p. 278.
130. GMP+ BA 2. Контроль остатков и однородности критически важных кормовых добавок и ветеринарных лекарственных препаратов:

Международный стандарт. Редакция RU 01.01.2022.

131. GMP+ BA 2. Контроль остатков: Международный стандарт. Редакция RU 01.07.2017.
132. Kapranova, A.B., Bakin M.N., Verloka I.I., Zaytsev A.I. Methods of describing the movement of solid dispersed media in different planes for sections of the mixing drum / A.B. Kapranova, M.N. Bakin, I.I. Verloka, A.I. Zaytsev // Transactions of the Tambov State Technical University. – 2015. – vol. 21, no. 2. – pp. 296-304.
133. Khan, Z.S. High-speed measurement of axial grain transport in a rotating drum / Z.S. Khan, F.V. Bussel, M. Schaber, R. Seemann, M. Scheel, M.D. Michiel // New Journal of Physics. – 2011. – issue 13. 105005. Doi:10.1088/1367-2630/13/10/105005/
134. Kravchenko, T.P. Polypropylene-based nanostructured materials / T.P. Kravchenko, I.Y. Gorbunova, S.N. Filatov // International Polymer Science and Technology. – 2017. – Vol. 44, no. 4. – P. 45.
135. Kwolek, S.L. The Nylon Rope Trick / S.L. Kwolek, W.M. Paul // Journal of Chemical Education. – 1959. – pp. 182-184.
136. Pershin, V.F. Production of Few-Layer and Multilayer Graphene by Shearing Exfoliation of Graphite in liquid / V.F. Pershin, M.N. Krasnyanskiy, Z.A.A. Alhilo, A.M.R. Al-Mashhadani, A.A. Baranov, A.A. Osipov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 693 012023. – 2019.
137. Podgornyj, Y.I. Experimental determination of useful resistance value during pasta dough kneading / Y.I. Podgornyj, T.G. Martynova, V.Y. Skeebe, A.S. Kosilov, A.A. Chernysheva, P.Y. Skeebe // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Issue 87. 082039. DOI: 10.1088/1755-1315/87/8/082039.
138. Saimanova, Z. Acoustic Method of Quality Control of Two-Component Composite Materials / Z. Saimanova, S. Zhumadillayeva, A. Zhumadillayeva, A. Mukhametzhanova, A. Smagulova, G. Abildaeva // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 44. – p. 16.

139. Sierksma, G. *Linears and Integer Optimization: Theory and Practice* / G. Sierksma, Y. Zwols // CRCPress. – 2015. ISBN 1-498-71016-9.
140. Sivasubramanian, P. *History of Composites and Polymers* / P. Sivasubramanian, K. Mayandi, V. Arumugaprabu, N. Rajini, S. Rajesh // *Polymer-Based Composites*. – 2021. – pp.1-21.
141. Szymański, R. *Quality Control Process of Manufactured Composite Structures* / R. Szymański // *Transactions on Aerospace Research*. – 2017. – pp.95-103.
142. Vasin, S.A. *Some aspects of the production of high-performance composite mixtures and materials* / S.A. Vasin, A.V. Evseev, A.A. Malikov // *Tsvetnye Metally*. – 2022. – 6. – pp. 51-58.
143. Weinekotter, R. *Mixing of solids* / R. Weinekotter, H. Gericke // Kluwer academic publishers. – 2000.
144. Yudaev, I.V. *Modeling of processes in a screw batcher* / I.V. Yudaev, A.N. Globin, N.V. Plotnikova // *Bulletin of the Lower Volga Agro-University Complex: science and higher professional education*. – 2018. – No. 4 (52). – pp. 353-360. ISSN 2071-9485.
145. Википедия. Свободная энциклопедия. Композитный материал [Электронный ресурс]: URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Композитный\\_материал](https://ru.wikipedia.org/wiki/Композитный_материал) (дата обращения: 18.01.2023).
146. Исторический обзор кафедры «Конструирование аппаратов химических производств» Московского института химического машиностроения [Электронный ресурс] URL: [http://v.michm.ru/index.php/Глава\\_3.\\_ОНИ\\_СОЗДАВАЛИ\\_КАФЕДРУ](http://v.michm.ru/index.php/Глава_3._ОНИ_СОЗДАВАЛИ_КАФЕДРУ) (дата обращения: 10.02.2023).
147. Каталог смесительного оборудования компании «АЙРИХ» [Электронный ресурс] URL: <https://www.eirich.ru/ru/tekhnologija/smesitelnoe-oborudovanie/> (дата обращения: 18.10.2022).
148. Материалы строительного портала StroyPlus.ru. Российский рынок алмазного инструмента [Электронный ресурс] URL:

- <https://stroy puls.ru/tehnika-i-oborudovanie/30268/> (дата обращения: 10.02.2023).
149. Официальный сайт компании «Bühler» [Электронный ресурс] URL: <https://former.buhlergroup.com/europe/ru/9869.htm#> (дата обращения: 10.02.2023).
150. Официальный сайт компании «Bühler» [Электронный ресурс] URL: <https://former.buhlergroup.com/europe/ru/9869.html> (дата обращения: 18.10.2022).
151. Официальный сайт компании «Gericke» [Электронный ресурс] URL: <https://www.gerickegroup.com/contact/russia> (дата обращения: 18.10.2022).
152. Официальный сайт компании «Uelzener» [Электронный ресурс] URL: <https://www.uelzener-ums.de/kontakt/> (дата обращения: 18.10.2022).
153. Официальный сайт компании «ЖАСКО». Оборудование для переработки сельхозпродукции [Электронный ресурс] URL: <http://jasko.ru/company/> (дата обращения: 10.02.2023).
154. Официальный сайт компании ООО «Шанхай» «SIECHI» Промышленное оборудование. Раздел сайта – Продукты и решения для порошковых материалов [Электронный ресурс] URL: <http://sieheindustry.com/ru/products/powder.html?yclid=6419871455732332848> (дата обращения: 10.12.2022).
155. Официальный сайт компании ООО «Биохим-ТЛ». Производство премиксов и комбикормов [Электронный ресурс] URL: <http://biohim.com.ru/technology> (дата обращения: 10.02.2023).
156. Официальный сайт Федерального института промышленной собственности – ФИПС, (запрос: «Смесители сыпучих материалов») [Электронный ресурс] URL: <https://fips.ru/iiss/> (дата обращения: 10.02.2023).
157. Сайт рейтингового агентства РАЕХАналитика. Инновации в строительном кластере (строительные смеси) [Электронный ресурс] URL: [https://raex-a.ru/researches/city/inno\\_r\\_db](https://raex-a.ru/researches/city/inno_r_db) (дата обращения: 10.02.2023)

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**СУЩЕСТВУЮЩИЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СМЕСИ**

Сводная таблица А.1 величин [69], предложенных различными авторами в качестве критерия оценки качества гетерогенных смесей

Таблица А.1.

Название критерия	Формула для расчета
Мера рассеяния $M$	$M = \frac{1}{\bar{C}} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n}$
Коэффициент неоднородности $V_C$	$V_C = \frac{100}{\bar{C}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}$
Степень смешивания $M$	$M = 1 - \frac{S^2 - S_R^2}{S_0^2 - S_R^2}; S_0^2 = p(1-p);$ $S_R^2 = \frac{p(1-p)}{m}$
Степень смещения $M$	$M = \frac{S}{S_0}; S_0 = C_0(1 - C_0)$
Стандартное отклонение $S$	$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}$
Степень смещения $M$	$M = 1 - \frac{S}{S_0}; M = 1 - \left(\frac{S}{S_0}\right)^2$
Критерий однородности $A$	$A = \left(\frac{\log \frac{S_0}{S}}{\log \frac{S_0}{S_R}}\right)^{0,5}; S_R^2 = \frac{pq  p(d_3)_p + q(d_3)_q }{g}$
Приведённое стандартное отклонение $S_{II}$	$S_{II} = \frac{S}{S_0}; S_0 = \sqrt{p(p-1)}$



Коэффициент изменчивости $V$	$V = \frac{S}{\bar{C}}$
Коэффициент качества $J$	$J = \frac{\bar{C}}{p}$
Относительная дисперсия $\frac{S_p}{P}$	$\frac{S_p}{P} = \frac{1}{g} \left[ \left( \frac{1-p}{p} \right)^2 p\gamma_p (1+C_p^2) + q\gamma_q (1+C_p^2) \right]$
Дисперсия $S_{II}^2$	$S_{II}^2 = S^2 - S_R^2; S_R = \frac{pq}{m}$
Степень перемешивания $M$	$M = \ln \frac{100}{x}; \frac{x}{100} = \frac{F_0 - F}{F}$
Полнота перемешивания $U$	$U = \alpha \Delta F = \frac{F}{F_0}$
Степень перемешивания $M$	$M = \log \left[ \frac{1}{1 - \left( \frac{S_0}{S} \right)} \right]$
Интенсивность сегрегации $J_C$	$J_C = \frac{S_a^2}{C_a \times C_b} \equiv \frac{S_b^2}{C_a \times C_b}$
Степень смешивания $M$	$M = \frac{S - S_R}{S_0 - S}; S_0^2 = p(1-p); S_R^2 = \frac{p(1-p)}{m}$
Мера неупорядоченности $\eta$	$\eta = \frac{2\pi\mu \sum_{i=1}^{K_1} r_i^2}{\chi^2}; \chi^2 = \sum_{i=1}^{K_1} \frac{(v_i - p_i)^2}{p_i}$
Параметр нецентральности $\lambda^2$	$\lambda^2 = n \sum_{i=1}^{K_2} \frac{(v_i - p_i)^2}{p_i}$
Степень смешения $\Phi$	$\Phi = v \sum_{i=1}^{K_3} (Z_i - \xi_0)^2; z_i = 2 \arcsin \sqrt{v_i}; \xi_0 = 2 \arcsin \sqrt{p_i}$

Примечание. Для удобства в таблице принято единое обозначение одинаковых величин, а не так, как они даются авторами. Здесь:

$S_0$  - среднее квадратическое отклонение концентрации ключевого компонента в пробах (СКВО) для совершенно несмешанной смеси;

$S_R$  - СКВО при рандомальном состоянии смеси, т.е. при максимально возможном в статистическом смысле смешении;

$S_{II}$  - истинное значение СКВО смеси;

$S$  - измеренное значение СКВО;

$g$  - вес пробы;

$p, g$  - фактическое весовое относительное содержание компонентов в смеси;

$(d_{\vartheta})_p; (d_{\vartheta})_q$  - эффективный средний размер частиц в пробах соответственно для компонентов  $p$  и  $q$ ;

$C_p; C_q$  - коэффициенты отклонения веса частиц для компонентов  $p$  и  $q$

$$\left( C_p = \frac{S_p}{\gamma_p}; C_q = \frac{S_q}{\gamma_q} \right);$$

$\gamma_p, \gamma_q$  - средние значения веса частиц, отнесённые к числу частиц компонентов  $p$  и  $q$ ;

$F$  - поверхность раздела между компонентами к моменту их анализа;

$F_0$  - максимально возможная поверхность раздела между компонентами;

$x$  - доля неперемешанной смеси;

$\alpha$  - коэффициент пропорциональности;

$U$  - вероятность того, что хотя бы один из элементов данной поверхности раздела попадёт в выделенный элементарный объём;

$\Delta F$  - элемент поверхности раздела между компонентами;

$m$  - число частиц в пробе;

$r_i$  - кратчайшее расстояние между частицами компонентов;

$\mu$  - среднее число произвольных точек в единице рассматриваемой площади среза пробы;

$K_1$  - число клеток, на которое разбивается рассматриваемая площадь;

$\chi^2$  - величина критерия Пирсона со степенью свободы  $K_1$ , которая превышает с вероятностью  $\alpha$ ;

$\nu_i$  - наблюдаемая частота появления  $i$ -го компонента;

$p_i$  - заданная частота появления  $i$ -го компонента;

$\nu$  - среднее значение частоты появления величины  $\nu_i$  для данной серии опытов;

$K_2$  - число смешиваемых компонентов;

$K_3$  - число степеней свободы, равное количеству отбора проб минус число наложенных связей при обработке опыта;

$S_a, S_b$  - СКВО концентрации компонентов соответственно по  $a$  и  $b$ ;

$\bar{C}_a, \bar{C}_b$  - среднее значение концентраций компонентов  $a$  и  $b$  в пробах.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ**



## ООО «Биохим-ТЛ»

Россия, 300013, г. Тула, ул. Болдина, д. 47, оф. 20  
Телефон: (4872) 24-74-99 т/ф,

### АКТ

научно-технической комиссии о реализации научных положений и результатов кандидатской диссертации Юрасковой Ирины Андреевны на тему:  
**«Совершенствование методик и инструментария обеспечения качества процессов производства смесей и композитов»**

Научно-техническая комиссия в составе генерального директора В.А. Родионовского, главного инженера А.Ю. Соловьева, главного технолога С.Н. Никитина, составили настоящий акт в том, что научные положения и результаты диссертационной работы, а именно:

- конструкции дозирующих устройств и немиксинговых машин для приготовления гетерогенных смесей и композиций, их режимные и геометрические параметры,
- математические модели процессов дозирования и немиксинга гетерогенных смесей и композиций, в том числе премиксов, при условии возможности формирования управляемой однородности продуктов из дискретных и непрерывных потоков компонентов,
- методики и критерии оценки и управления качеством получаемых на них фасованных и эффективно используемых смесей и композиций,
- программное обеспечение для инженерно-практического метрологического сопровождения предлагаемых производственных технологий (свидетельство на программу для ЭВМ № № 2023611457 «Программа расчёта показателей качества смесей и композитов на основе диаграммы Парето»)

приняты к практической реализации на предприятии и будут использованы при *разработке конструкций* узлов дозирования компонентов, *приготовлении премиксов* различного назначения на машинах, реализующих управляемое формирование однородности гетерогенных композиций премиксов из дискретных и непрерывных потоков компонентов и *метрологическом сопровождении* производства с использованием разработанных критериев оценки качества продукции в соответствии с тематическим планом развития производства.

Создание эффективных устройств высокой точности дозирования различных модифицирующих премиксы добавок обеспечивает возможность синтеза из них высококачественных и высокоэффективных гетерогенных смесей и композитных премиксов в немиксинговых машинах в соотношениях до 1:200 при содержания ключевых компонентов по коэффициенту вариации до  $C_v < 1,5-4,0\%$ , а также использование методик контроля качества получаемых продуктов на основе практического применения разработанных в диссертации И.А. Юрасковой критериев оценки и управления качеством позволит значительно улучшить качественные характеристики выпускаемой продукции и ее конкурентоспособность на рынке, по сравнению с профильной продукцией, производимой с помощью традиционных т.

Генеральный директор АО «БИОХИМ-ТЛ»

В.А. Родионовский

Главный инженер

А.Ю. Соловьев

Главный технолог

С.Н. Никитин



2023 г.



## ООО «ГИПЕРИОН»

300026, г. Тула, Ленина пр-кт, дом 113А, оф. 11

ИНН 7106530000/КПП 710601001

р/с 40702810566000012631

ТУЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ №8604

ПАО СБЕРБАНК

к/с 30101810300000000608 БИК 047003608



Генеральный директор  
ООО «ГИПЕРИОН»

А.Ю.

Попов

« 22 » 08 2023 г.

### А К Т

научно-технической комиссии о реализации научных положений и результатов кандидатской диссертации Юрасковой Ирины Андреевны на тему:  
**«Совершенствование методик и инструментария обеспечения качества процессов производства смесей и композитов»**

Научно-техническая комиссия в составе генерального директора А.Ю. Попова, начальника участка И.Ю. Кишканова, составили настоящий акт в том, что научные положения и результаты диссертационной работы, а именно: конструкции устройств для приготовления гетерогенных смесей и композиций, их режимные и геометрические параметры, математические модели процессов дозирования строительных добавок и нонмиксинга, в том числе цементно-песчаных смесей, методики и критерии оценки качества получаемых на них ЦПС, результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований процессов дозирования добавок и наполнителей, методики анализа и управления качеством композитов на основе теории формирования управляемой однородности для приготовления ЦПС, в том числе со строительными добавками различного назначения (свидетельство на программу для ЭВМ № № 2023611457)

приняты к практической реализации на предприятии и будут использованы при разработке, а также при метрологическом сопровождении производства конструкций узлов дозирования компонентов и приготовления из них цементно-песчаных смесей, а также композиций с добавлением ключевых компонентов в виде колеров, пластификаторов, ускорителей и замедлителей схватывания ЦПС, диспергирующих полимерных, водоудерживающих и других добавок различного назначения в соответствии с планом развития производства на нашем предприятии.

Создание эффективных технологических питающих устройств для дозирования различных сыпучих и увлажненных добавок, а также использование системы контроля и управления качеством продукции на основе разработанных И.А. Юрасковой критериев формирования управляемой однородности обеспечивает возможность приготовления из них высококачественных и высокоэффективных цементно-песчаных композиций. Это позволит осуществлять процессы создания сложных композитных

структур с высокими соотношениями при наличии двух и более ключевых компонентов. При этом значительно увеличатся прочностные характеристики конечных продуктов: бетонов, наливных полов, гидропломб, инъекционных составов, гидроизоляционных, ремонтных и других материалов. Использование в производстве данных смесевых композиций позволит увеличить портфель заказов на 15-20% и получить экономический эффект от 0,8 до 1,2 млн. рублей в месяц.

Генеральный директор ООО «ГИПЕРИОН»

  
А.Ю. Попов

Начальник участка

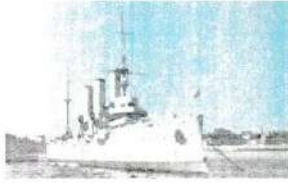
  
И.Ю. Кишканов

«22»

 2023 г.

М.П.





Общество с ограниченной  
ответственностью  
«Аврора»

ИНН: 7111021087 КПП: 711101001, 301355, Тульская область, Алексинский р-н, д. Козащевка, ул.  
Современная, д.2, тел.8-919-078-1111, [smuravlev0502@mail.ru](mailto:smuravlev0502@mail.ru)



АКТ

научно-технической комиссии о реализации научных положений и результатов  
кандидатской диссертации Юрасковой Ирины Андреевны тему:  
«Совершенствование методик и инструментария обеспечения качества процессов  
производства смесей и композитов»

Научно-техническая комиссия в составе генерального директора С.В.Муравлева, главного инженера Г.Р. Сайфутдинова, главного бухгалтера Л.М. Колгановой составили настоящий акт в том, что научные положения и результаты диссертационной работы Юрасковой И.А., а именно: конструкции используемых дозирующих устройств и немиксеров для приготовления гетерогенных смесей и композитных материалов, математические модели процессов дозирования компонентов гетерогенных композиций и немиксинга строительных смесей с возможностью управления формированием однородности, методики и критерии оценки их качества, результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований, инженерные методики использования разработанных критериев оценки качества для приготовления цементно-песчаных смесей с различными строительными добавками приняты к практической реализации на предприятии и будут использованы при разработке новых технологических процессов при приготовлении ЦПС с функциональными добавками в смесителях (немиксерах) различных конструкций в соответствии с планом развития производства на нашем предприятии.

Актуальна и рекомендована разработка нового программного обеспечения, позволяющего решать сложную задачу синтеза, анализа и корректировки показателей качества смесей и композитных материалов различного применения, особенно применительно к цементной составляющей (свидетельство на программу для ЭВМ № 2023611457).

Рассмотрена возможность использования разрабатываемого комплекса мер улучшения качества при производстве керамической и бетонной продукции, теплоизоляционных и кладочных растворов и смесей, в том числе композиций с перлитными заполнителями и другими добавками, что позволит повысить качество продукции и эффективность её использования потребителем. Производство данных конкурентоспособных смесевых и композитных изделий, при прогнозируемом росте продаж на уровне 5-8% позволит получить экономический эффект от 2 до 4 млн. рублей в год.



Генеральный директор ООО «Аврора» С.В. Муравлев

Главный инженер Г.Р. Сайфутдинов

Главный бухгалтер Л.М. Колганова

«16» 08 2023 г.





УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

В.В. Котов

«23» 08 2023 г.

об использовании научных положений и результатов  
кандидатской диссертации Юрасковой Ирины Андреевны на тему:  
**«Совершенствование методик и инструментария обеспечения качества процессов  
производства смесей и композитов»**

в учебном процессе Тульского государственного университета

Комиссия в составе заведующего кафедрой «Инструментальные и метрологические системы» (ИМС), д-ра техн. наук, проф. О.И. Борискина, заведующего кафедрой «Механика и процессы пластического формоизменения» (МиППФ), д-ра техн. наук, проф. С.Н. Ларина, заведующего кафедрой «Промышленная автоматика и робототехника» (ПАиР), канд. техн. наук, доц. О.А. Ерзина, составили настоящий акт в том, что научные положения и результаты диссертационной работы:

- математические модели и компьютерные программы для моделирования процессов дозирования, нонмиксинга и управления качеством различных гетерогенных композиций (свидетельство на программу для ЭВМ № № 2023611457);

- инженерные методики управления качеством гетерогенных смесей и композитных материалов на основе разработанных критериев оценки их качества концепции управления формирования однородности,

реализованы в учебном процессе на вышеупомянутых кафедрах при выполнении курсовых проектов, лабораторных (практических) работ по дисциплинам: «Метрология, стандартизация и сертификация», «Квалиметрия и управление качеством», «Математическое моделирование систем и процессов», «Управление качеством процессов производства и оказания услуг» и других (направлений 27.03.01 и 27.04.01 – «Стандартизация и метрология» и 27.03.02 и 27.04.02 – «Управление качеством»), «Проектирование технологических процессов в машиностроении», «Современные системы автоматизированного проектирования» (направлений 15.03.01 и 15.04.01 – «Машиностроение» и 15.04.02 «Технологические машины и оборудование»), «Автоматизация транспортировки, загрузки и сборки изделий», «Динамика и точность автоматизированного оборудования» и других (направлений 15.03.04 и 15.04.04 – «Автоматизация технологических процессов и производств», профиль «Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении»), а также выпускных квалификационных работ студентами, обучающимися в бакалавриате и магистратуре по вышеуказанным направлениям и профилям подготовки.

Заведующий кафедрой ИМС  
д-р техн. наук, проф.

О.И. Борискин

Заведующий кафедрой МиППФ,  
д-р техн. наук, проф.

С.Н. Ларин

Заведующий кафедрой ПАиР  
канд. техн. наук, доц.

О.А. Ерзин

«23» 08 2023 г.

*И.А. Борискин*

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**ПРОЧИЕ ДОКУМЕНТЫ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023611457

### Программа расчёта показателей качества смесей и композитов на основе диаграммы Парето

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ) (RU)*

Авторы: *Евсеев Алексей Владимирович (RU), Васин Сергей Александрович (RU), Благовещенский Дмитрий Иванович (RU), Козловский Владимир Николаевич (RU), Юраскова Ирина Андреевна (RU), Китанина Татьяна Игоревна (RU)*



Заявка № **2023610173**

Дата поступления **09 января 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **19 января 2023 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью  
Сертификат: 65b60077e14e40f0a34edbd24145d5c7  
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 20.12.2022 по 26.05.2023

*Ю.С. Зубов*