

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Фатахетдинов Артем Мякусович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО СМЕШИВАНИЯ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Огурцов
Валерий Альбертович

Иваново – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА.....	10
1.1. Общая характеристика сыпучих строительных смесей.	10
1.2. Примеры аппаратурного оформления смесительного оборудования.....	12
1.3. Процесс смешивания сыпучих смесей как объект математического моделирования.....	24
1.4. Выводы по главе 1. Постановка задач исследований.....	31
2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ВИБРАЦИОННЫХ СМЕСИТЕЛЯХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО И НЕПРЕРЫВНОГО СПОСОБА ДЕЙСТВИЯ.....	33
2.1. Построение математической модели процесса периодического смешивания в вибрационном смесителе.....	34
2.2. Модель непрерывного смешивания в вибрационном смесителе.....	45
2.3. Выводы по главе 2.....	58
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В АППАРАТАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ.....	59
3.1. Техника эксперимента периодического смешивания и методика обработки полученных результатов.....	59
3.1.1. Описание экспериментальной установки. Цели экспериментальных исследований.....	59
3.1.2. Методика определения стохастических параметров ячеечной модели перемешивания сыпучих смесей по распределению частиц ключевого	

компонента по высоте виброожиженного слоя.....	63
3.1.3. Исследование движения частиц по виброожиженному слою при их перемешивании.....	69
3.1.4. Методика определения стохастических параметров ячеечной модели перемешивания сыпучих смесей по результатам тестовых экспериментов фракционирования той же смеси.....	73
3.2. Расчетно-экспериментальные исследования процесса получения цементно-песчаных смесей на лабораторной установке периодического действия.....	82
3.3. Выводы по главе 3.....	88
4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ СМЕШИВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ.....	89
4.1. Результаты внедрения результатов исследования в компании «ДАСО»..	90
4.2. Технико-экономическое обоснование рекомендаций установки вибрационного смесителя.....	93
4.3. Выводы по главе 4.....	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	98
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ.....	100
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	101
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. Разнообразие видов сухих строительных смесей позволяет существенно ускорять процессы строительства. Чем масштабнее стройка, тем выгоднее становится их применение. Использование сухих смесей в отделочных работах позволяет снизить трудозатраты на строительной площадке. Одним из основных процессов технологической линии производства сухих строительных смесей является смешивание и распределение малых добавок и премиксов в основной массе продукта. Однородность материала есть основное требование качества современных строительных смесей. Эксплуатационные характеристики строительных смесей будут зависеть от равномерности распределения отдельных компонентов в ее объеме. Неоднородность содержания малых добавок, вызванная некачественным перемешиванием, может негативно сказаться на эксплуатационных свойствах смеси. На качество их производства огромное влияние оказывает эффективность работы смесителей, а также сам процесс перемешивания. В качестве смесительного оборудования зачастую используются смесители принудительного действия, имеющие сложное аппаратное оформление и требующие использования электроприводов большой мощности. Применение вибрационных смесителей периодического и непрерывного действия имеет существенное преимущество, так как используются источники вибрации малой мощности. Вибровоздействие на сыпучую среду приводит к эффекту виброоживления смеси, силы сухого трения между частицами ослабевают, и они начинают интенсивно перемешиваться. Экспериментальное исследование кинетики перемешивания в условиях производства остается единственным вариантом расчета и проектирования смесителей. Однако даже незначительные изменения эксплуатационных характеристик и режимов работы смесителей требуют повторения всего объема экспериментальных исследований. Поэтому представляется актуальным решение этого противоречия с помощью современных математических моделей перемешивания, учитывающих параметры вибровоздействия аппарата на

сыпучую среду и реальные факторы производства сухих строительных смесей.

Степень разработанности темы. Моделированием процесса смешивания сыпучих сред занимались отечественные и зарубежные исследователи: В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, С.Ю. Арутюнов, А.И. Зайцев, В.Е. Мизонов, В.Ф. Першин, Ю.И. Макаров, Д.О. Бытев, А.Б. Капранова, Е.А. Баранцева, И. Сатома, О. Варрен, Л. Фан, С. Ватсон, Ж. Маккарти, Ф. Берtrand и многие другие [1 – 4, 12 – 20, 29 – 37, 62 – 92, 109 – 115]. Их исследования посвящены совершенствованию техники и технологии перемешивания сыпучих сред. Многообразие подходов к моделированию процесса перемешивания определило необходимость обоснования параметров вибровоздействия смесителя на сыпучую среду для получения требуемого качества сухих строительных смесей.

Цель работы – разработка новых подходов к исследованию процесса смешивания на основе новой более достоверной расчетно-экспериментальной информации о кинетике процесса для выбора технологических параметров работы смесителя, обеспечивающих повышение качества смеси.

Объектом исследования в работе являлись формирование фракционного состава продуктов смешивания сыпучих материалов и поиск возможностей управления его формированием с помощью параметров колебания смесителя с целью повышения эффективности процесса.

Предмет исследования – процессы непрерывного и периодического вибрационного смешивания сыпучих смесей.

Научная гипотеза состоит в предположении равенства скоростей сегрегации и коэффициентов макродиффузии частиц сыпучих материалов в процессах фракционирования и смешивания в виброожигенном слое, если операции проводятся с одними и теми же смесями при одинаковых вибрационных режимах.

Задачи исследования

1. На основе теории цепей Маркова разработать математические модели формирования качества смесей сыпучих сред в вибрационных смесителях периодического и непрерывного принципов действия, учитывающих параметры вибровоздействия аппарата на сыпучую среду.
2. Выполнить экспериментальные исследования процессов фракционирования и смешивания различных компонентов с помощью лабораторных установок периодического принципа действия для определения стохастических параметров моделей и верификации с опытными данными.
3. Провести проверку адекватности разработанных моделей по локальным и интегральным характеристикам процесса смешивания.
4. Определить параметры вибрационного воздействия на смешиваемые компоненты, обеспечивающие повышение качества смесей.
5. Реализовать расчетно-экспериментальные исследования процесса смешивания в промышленных условиях.

Научная новизна:

1. Разработаны математические модели процессов смешивания в аппаратах периодического и непрерывного принципов действия, позволяющие оценивать влияние параметров колебаний смесителя на качество готовой продукции, основанные на теории цепей Маркова, эффективно описывающую эволюцию процессов переработки дисперсных сред и учитывающую многообразие факторов, определяющих стохастическую природу процесса смешивания.
2. Теоретически описано и экспериментально подтверждено равенство скоростей сегрегации и коэффициентов макродиффузии процессов периодического смешивания и фракционирования сыпучих сред, проводимых с одной и той же смесью при одинаковых амплитудах и частотах вибрации установок, что позволило создать расчетно-экспериментальный метод определения стохастических параметров модели смешивания из тестовых опытов по виброклассификации сыпучих материалов.

3. Доказана адекватность ячеечной модели при периодическом смешивании изучаемому процессу по локальным и интегральным характеристикам процесса (эволюции состояния частиц ключевого компонента смеси по объему смесителя и степени неоднородности готового продукта).

4. . Экспериментально доказано влияние амплитудо-частотных характеристик колебаний смесителей на качество продуктов смешивания.

Теоретическая и практическая значимость работы. Рассмотренная математическая модель позволяет рекомендовать режимные параметры вибрации смесителей с учетом свойств сыпучего материала, обеспечивающие наилучшее качество сухих строительных смесей. На основе представленной модели реализованы компьютерные методы расчета процесса получения сухих строительных смесей в вибрационных смесителях, реализованные в матричной среде пакета MATLAB. Разработанный метод описания движения частиц перемешиваемых компонентов может применяться как при модернизации и проектировании смесительного оборудования. Полученные результаты исследования процессов перемешивания включены в учебные курсы для бакалавров «Специальное оборудование для производства строительных материалов», магистров «Моделирование случайных процессов в строительстве» и аспирантов «Исследование динамических процессов в работе машин и механизмов строительного оборудования», «Механическое оборудование строительных предприятий».

Методология и методы исследования. Модель процесса смешивания сыпучих смесей основана на математическом аппарате теории цепей Маркова, описывающем поведение дисперсных сред со случайными свойствами, принципы которой использовались в работах В.Е. Мизонова, С.В. Федосова, В.П. Жукова, Е.А. Баранцевой, З. Бернотата, А. Бертье и ряда других отечественных и зарубежных исследователей [29 – 37, 42 – 46]. Параметрическая идентификация модели выполнена на основе компьютерных и лабораторных исследований процесса перемешивания сыпучих смесей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель процесса смешивания сыпучих сред в смесителях периодического и непрерывного принципов действия, основанная на математическом аппарате теории цепей Маркова, учитывающая параметры колебаний смесителя.
2. Результаты компьютерных экспериментов с моделями процесса смешивания, которые позволили определить влияние скорости сегрегации и коэффициента макродиффузии на процесс миграции частиц по вибоожуженному слою при их перемешивании.
3. Методику определения скоростей сегрегации и коэффициентов макродиффузии частиц ключевого компонента смеси для математических моделей процессов смешивания по результатам тестовых опытов периодического фракционирования той же смеси.
4. Доказательство адекватности модели процессу смешивания сыпучих материалов по эволюции состояния смеси в объеме смесителя и степени ее отклонения качества от равномерного распределения частиц ключевого компонента по высоте вибоожуженного слоя.
5. Апробацию и возможность внедрения результатов исследований на предприятиях, технологические линии которых включают операцию смешивания сыпучих сред.

Степень достоверности полученных результатов. Степень достоверности полученных результатов подтверждается использованием при моделировании процесса смешения апробированный аппарат теории цепей Маркова и удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных значений распределения ключевого компонента смеси по объему смесителя.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на следующих отечественных и международных конференциях: «Надежность и долговечность машин и механизмов» VI Всероссийская научн.-практ. конф. Иваново: ИИГПС МЧС, 2015; «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы. SMARTEX – 2016» XIX практич. форум. Иваново: ИВГПУ.

2016; «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (Поиск-2017)». Межвузовская науч.-техн. конф. Иваново: ИВГПУ. 2017; «Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (Поиск-2018)» Межвузовская науч.-техн. конф. Иваново: ИВГПУ. 2018; «Энергия 2019» XIV Всероссийская (международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Иваново: ИГЭУ, 2019.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе, 5 работ в изданиях, предусмотренных перечнем ВАК (из них 2 в изданиях, индексируемых Scopus).

Структура и объем работы. Диссертация общим объемом 126 страниц, состоит из введения, 4-х глав, заключения и приложения, списка использованных источников (147 наименований).

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА

Сухие строительные смеси, такие как измельчённая сухая глина и штукатурка на основе гашёной извести, применялись еще в древнем Египте. Позднее для выравнивания поверхностей использовали штукатурки на основе гипса и алебаstra. В Средневековье для улучшения качества сухих смесей менялись вводились разнообразные добавки, такие как растительные масла, казеин из творога и лецитин из яичного белка, придающих новые свойства строительным материалам. В XIX веке в качестве связующего компонента использовался цемент. Это позволило расширить сферы применения сухих смесей. Строительные процессы стали проще, сроки строительства сократились [1 – 4, 15 – 18, 72, 86, 127 – 129]. При использовании сухих смесей, доставленных на строительную площадку в мешках, которые удобно перевозить, отпала необходимость в доставке огромных ёмкостей с растворами. Сухих смесей имеют ряд преимуществ перед традиционными растворами. Смеси смешиваются с водой на строительной площадке в количестве, необходимом для проведения конкретного объема работ. Это способствует тому, что не получится, что смеси на объект не хватило или остался излишек.

1. 1. Общая характеристика сыпучих строительных смесей

Сухие строительные смеси представляют собой многокомпонентную среду, которая при добавлении воды становится пластичным раствором разнообразного назначения. Смеси есть композиции из минеральных вяжущих, наполнителей с определенной дисперсностью, связующих на основе полимеров и модифицированных добавок.

Сухие смеси условно делятся на две группы: универсальные для общего применения и специализированные. Универсальные смеси применяются

для штукатурных работ, связующего вещества для кирпичей и блоков. Одной и той же смесью можно проводить разные виды работ. Специализированные смеси применяются для наружных работ в регионах с резким изменением температурного режима, высокой влажности.

В соответствии с ГОСТ 31189-2003 «Смеси сухие строительные. Классификация» смеси делятся: по основному назначению; по примененному вяжущему; по наибольшей крупности заполнителей.

По основному назначению сухие строительные смеси делятся на выравнивающие смеси, которые применяются для выравнивания плоскостей стен и потолков, которые в свою очередь подразделяются на штукатурные и смеси для декоративной отделки. По основному назначению применяются шпаклевочные смеси для заделки неровностей поверхностей для последующей шлифовки. Так же применяются облицовочные смеси для отделки вертикальных и наклонных поверхностей штучными отделочными материалами. К облицовочным смесям относятся клеевые смеси, применяемые для облицовки поверхностей плиткой, для наклеивания теплоизолирующих материалов с теплоизолирующими характеристиками и армирующей сетки при использовании легких штукатурных систем с теплоизолирующими свойствами, для заполнения шовного пространства между облицовочными штучными материалами. К смесям по основному назначению относятся напольные смеси, которые делятся на выравнивающие и несущие.

Деление смесей по применяемому вяжущему обусловлен тем, что его вид определяет условия твердения и эксплуатацию смесей, влажностный режим, морозостойкость, стойкость к циклическому увлажнению и высушиванию. По виду вяжущего сухие строительные смеси бывают – гипсовые, известковые, магнезиальные, цементные, полимерные и смешанные. В качестве водоудерживающих добавок используют производные метилцеллюлозы, эфиры крахмала, обеспечивающие загущение смеси для ее связности и эластичности. Водоудерживающее добавки составляет от 0,05% до 0,4% от массы смеси.

В сухих смесях в качестве суперпластификаторов используют соединения на основе нафталинформальдегида, меламинформальдегида, поликарбосилатов. Их дозировка составляет от 0,1% до 1,2% массы смеси.

По наибольшей крупности заполнителей смеси бывают бетонные, растворные и дисперсные. В качестве заполнителей используют пески с размером от 0,315 до 5 мм. В качестве наполнителей применяют дисперсные материалы, например карбонатную муку с размером частиц меньше 0,16 мм.

Если рассматривать условия применения напольных смесей, то их можно разделить на: уплотняемые, самоуплотняющиеся, затирочные, ремонтные. Уплотняемые смеси применяются для изготовления конструкций покрытия пола, самоуплотняющиеся — для литевой технологии, затирочные — для финишной отделки. Многообразие ремонтных смесей, которые применяются для восстановления проектных показателей конструкций. Они подразделяются на поверхностные смеси, инъекционные смеси и защитные. смеси — используются в целях создания защитных покрытий на поверхности конструкций. Защитные смеси можно разделить на ингибирующие (антикоррозионная защита металлических и железобетонных конструкций), биоцидные (защита конструкций от воздействия бактерий, грибов, водорослей, лишайников), огнезащитные, морозозащитные, радиационно-защитные, гидроизоляционные и многие другие.

Сухие строительные смеси являются одним из наиболее высокотехнологичных и востребованных продуктов на рынке строительных материалов.

1.2. Примеры аппаратурного оформления смесительного оборудования

На современных предприятиях строительной, горно-обогатительной, химической, сельскохозяйственной и других отраслях промышленности, где эксплуатируются технологические линии, которые включают участки перемешивания сыпучих сред, применяют смесители различных модификаций и

конструктивного оформления. Перемешивающие аппараты делятся на смесители непрерывного и периодического действия. Смесители непрерывного действия разделяются на горизонтально-лопастные, барабанные, спирально-винтовые, роторные, гравитационные, центробежные, вибрационные. Аппараты периодического действия делятся на смесители барабанного типа, червячнолопастные, плунжерные, ленточные, роторные, центробежные, пневмосмесители.

Методы перемешивания можно разделить на пересыпание, перелопачивание, наслаивание компонентов, смешение компонентов в виброожиженном слое. В зависимости от задач, которые ставятся перед технологами, отвечающими за процесс перемешивания в производстве сухих строительных смесей, а также физико-механических и химических свойств исходных сыпучих компонентов, подбираются тип и модификация перемешивающих аппаратов.

Наиболее простыми и наиболее надежными в эксплуатации считаются смесители, в которых подвижность обеспечивается вращением рабочего органа вокруг неподвижной оси [3, 18, 57]. Например, достаточно широко распространен смеситель, показанный на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1. Смеситель типа «пьяная бочка»

Смесители типа «пьяная бочка» работают по принципу мягкой обработки среды без разрушающего воздействия на сыпучий материал.

Могут применяться смесители, у которых ось вращения не совпадает с осью симметрии барабана (рисунок 1.2.)

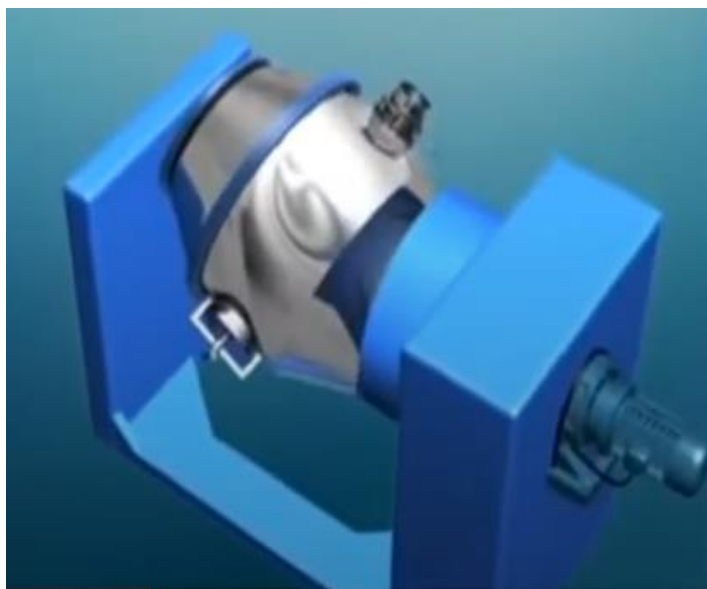


Рисунок 1.2. Смеситель с осью вращения, не совпадающей с осью барабана

Смесители, один из которых показан на рисунке 1.3, имеют неподвижный корпус, а сыпучий материал приводятся в подвижное состояние путем движения внутренних элементов. На рисунке 1.3. представлен такой конический шнековый смеситель Nauta® компания HOSOKAWA MICRON B.V. (Нидерланды), разработанный специально для склонных к сегрегации сыпучих продуктов, пастообразных и вязких материалов. В настоящее время шнековый смеситель периодического действия Nauta® признан во всем мире из-за высокой точности смешивания. Компания продолжает заниматься исследованием, разработкой и усовершенствованием смесительного оборудования данного типа. Средняя скорость вращения шнека составляет 70 об/мин; скорость вращения механического манипулятора меняется в преде-

лах от 1 до 2 об/мин. Окружная скорость вращения лопастей шнека меняется от 0,5 до 2 м/с. Вращающийся смесительный шнек перемещает сыпучий материал из нижней части смесителя в верхнюю. Механический манипулятор обеспечивает конвективное смешивание частиц и необходимое сдвиговое воздействие. Рабочая камера смесителя показана на рисунке 1.4. При рециркуляции под действием веса скорость частиц в нисходящем потоке увеличивается, так как диаметр смесителя уменьшается. Синхронность данных действий обеспечивает быстрое перемешивание и высокую точность смешивания.



Рисунок 1.3. Конический шнековый смеситель фирмы Nauta®

Лопастной смеситель периодического действия для перемешивания сухих смесей серии "СС-500" разработан конструкторским отделом компании «МЕТЕМ» (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4. Рабочая камера шнекового смесителя Nauta®

Его производительность - 4-5 м³/час., частота вращения вала - 65 об/мин, мощность двигателя - 7,5 кВт, привод оснащен цилиндрическим редуктором. Оборудован одним загрузочным люком и шиберной заслонкой с пневмоприводом для уменьшения времени выгрузки готовой смеси. Обечайка смесителя изготовлена из стали толщиной 6 мм, боковые стенки - 8 мм. Перемешивание происходит с помощью усиленных лопаток.



Рисунок 1.4. Лопастной смеситель периодического действия серии «СС-500» компании «МЕТЕМ»

В смесителях периодического и непрерывного действия для перемешивания сыпучих материалов могут использоваться шнеки. На рисунке 1.5 показана рабочая камера шнекового смесителя. В камере могут находиться один или два шнека, которые могут в дну или разные стороны.



Рисунок 1.5. Рабочая камера шнекового смесителя

Смесители также выпускаются в двухвальной исполнении. Смеситель, показанный на рисунке 1.6, перемещает смесь по рабочей камере лопатками, которые могут вращаться в неподвижном цилиндрическом корпусе.



Рисунок 1.6. Смеситель в двухвальной исполнении

Предприятием «Z-rack» была запущена в производство новая серия двухвальных смесителей для смешивания сыпучих материалов. Прототипом органа смешивания был четырехполосовой ленточный шнек хорошо себя зарекомендовавший в одновальных смесителях (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7. Двухвальный смеситель «Z-rack»

Лопастные смесители считаются тихоходными машинами. Скорость вращения их валов обычно не превышает 150 об/мин, а окружная скорость крайней точки лопатки меняется в пределах от 2 до 6 м/с. В лопастных смесителях для смешения и осевого перемещения сыпучих материалов служат лопатки, спирали, прерывистые витки шнека или винтовые ленты, закрепленные на одном или двух параллельных валах, расположенных в корпусе смесителя. Эти внутренние устройства обеспечивают интенсивность механического воздействия на сыпучую среду обеспечивая эффект псевдооживления [3, 12 – 14, 18, 57].

Применение вибрационных смесителей может осуществляться без применения дополнительных внутренних подвижных механических перемешивающих устройств. При этом достигается повышения надежности смесительных аппаратов и их эксплуатационной промышленной пригодности. По принципу действия вибрационные смесители делятся на смесители, в

которых на частицы сыпучего материала действуют силы вибрационного воздействия и силы тяжести, и на смесители, в которых помимо вибрационного воздействия, смесь принудительно приводят в движение с помощью подвижных внутренних перемешивающих устройств.

Благодаря высокой надежности и конструктивной простоты наибольшее распространение в промышленности получили вибрационные смесители, в которых на частицы сыпуче среды накладывается только вибрационное воздействие. В некоторых случаях смесители могут включать различные неподвижные элементы, которые закручивают или поворачивают поток сыпучего материала, которые интенсифицируют процесс перемешивания. К таким аппаратам относятся лотковые, бункерные и циркуляционные смесители [3, 18, 57].

На рисунке 1.8 представлена схема вибрационного смесителя, который используется для хорошо смешиваемых сухих материалов.

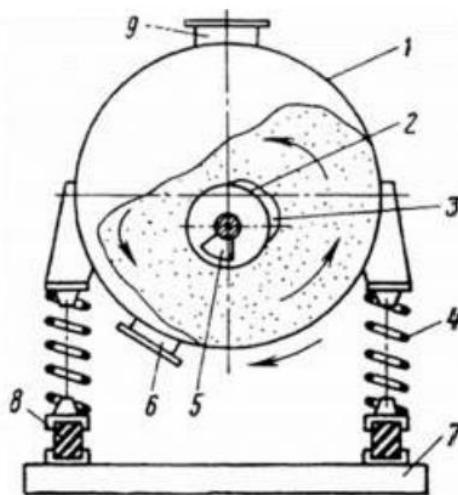


Рисунок 1.8. Схема вибрационного смесителя для сухих мелкодисперсных материалов: 1 – корпус (барабан); 2 – труба; 3 - вал; 4 – пружина; 5 – дебаланс; 6 – штуцер разгрузки; 7 – станина; 8 – амортизатор; 9 – штуцер загрузки

На рисунке 1.9. представлен вибрационный смеситель, разработанный в ФГБОУ ВО «Челябинский государственный агроинженерный университет» [3, 18].

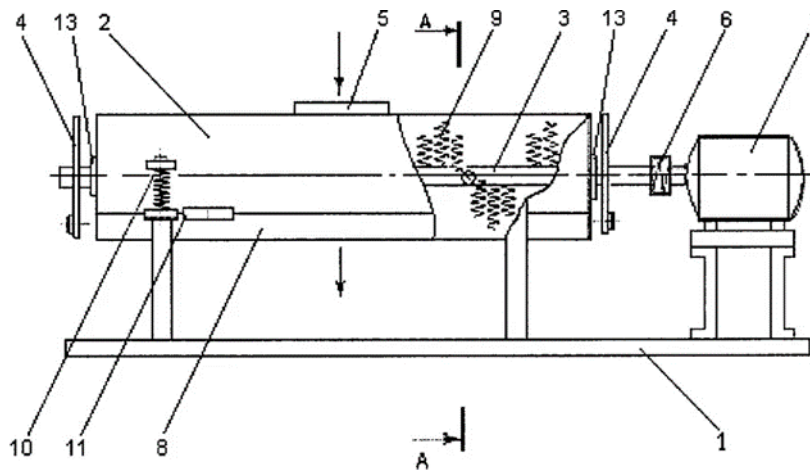


Рисунок 1.9. Вибрационный смеситель конструкции Челябинского агроинженерного университета: 1 — рама; 2 — контейнер; 3 — вал; 4 — вибровозбудитель; 5 — загрузочная горловина; 6 — муфта; 7 — электродвигатель; 8 — разгрузочный люк; 9 — перемешивающие пружины; 10 — пружины; 11 — шарнир; 12 — защелка; 13 — торцевые стенки

Вибрационный смеситель содержит контейнер цилиндрической формы с загрузочной горловиной и разгрузочным люком. В контейнере установлен вращающийся вал, на котором закреплены перемешивающие. Их длина меньше расстояния между пружинами, находящимися в одной плоскости по длине вала, и это расстояние меньше радиуса контейнера, а расстояние между соседними пружинами больше или равно диаметру пружин. Дебалансные вибровозбудители расположены на концах вала.

Устройство вибрационных смесителей бункерного типа представлены на рисунке 1.10. В вибросмесителях типа СмВ применяется пространственная вибрация. Только этим аппаратам свойственно движение смешиваемых материалов в трех измерениях. Движение частиц разной крупности под действием сил соударения между ними, когда вибровоздействие на сыпучую

чреду является трехмерным, перемешивание частиц проходит весьма интенсивно и требует малого времени для его качественного завершения.

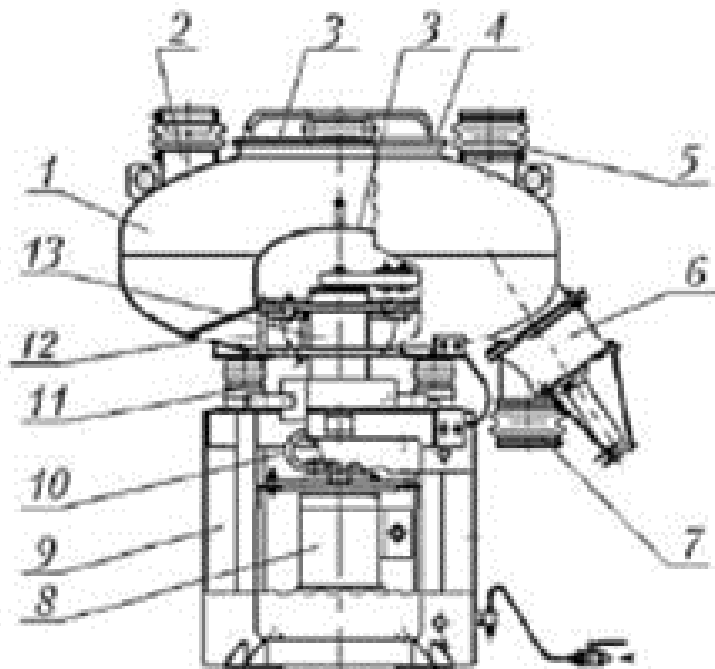


Рисунок 1.10. Устройство смесителя СмВ: 1 – камера; 2 – штуцер загрузки; 3 – крышки; 4 – хомут; 5 – уплотнитель; 6 – клапан; 7 – штуцер разгрузки; 8 – двигатель; 9 – рама; 10 – муфта; 11 – виброизолятор; 12 – болт; 13 – вибровозбудитель

Частицы материалов участвуют в циркуляционном движении со всей массой и совершают спиралеобразные движения внутри камеры. Взаимодействие между частицами материалов в камере весьма интенсивно. Это ускоряет процесс и позволяет получить однородную смесь за короткий промежуток времени. При этом не происходит дополнительного механического воздействия на сыпучие материалы. Смесители СмВ успешно конкурируют с планетарными, винтовыми, лопастными смесителями. Их можно успешно применять для смешивания широкого диапазона материалов, например в строительстве для смешивания сухих строительных смесей, гипса и кварцевого песка, гипсовых шпаклевок, порошковых красок.

На рисунке 1.11 представлена конструкция вибрационного смесителя, в которой процесс смешивания осуществляется как за счет вибрации смесителя, так и за счет вращения корпуса смесителя [3, 18].

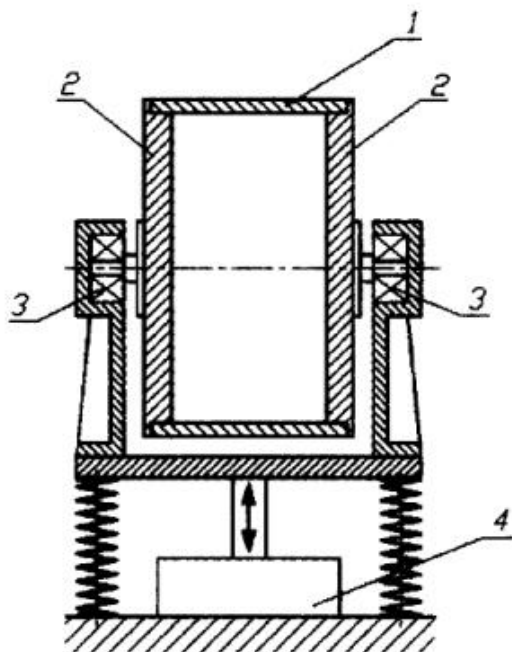


Рисунок 1.11. Вибрационный смеситель: 1 – корпус рабочей камеры; 2 – торцевые крышки; 3 – опоры, передающие вибрационное воздействие рабочей камере, 4 – вибропривод

На рисунке 1.12 представлена конструктивная схема вибрационного смесителя Алтайского государственного аграрного университета [13]. Процесс смешивания организуется за счет сложных траекторий колебаний рабочей камеры смесителя. При этом образуются потоки сыпучих материалов,двигающихся по камере смешения по сложным траекториям, что способствует интенсификации процесса.

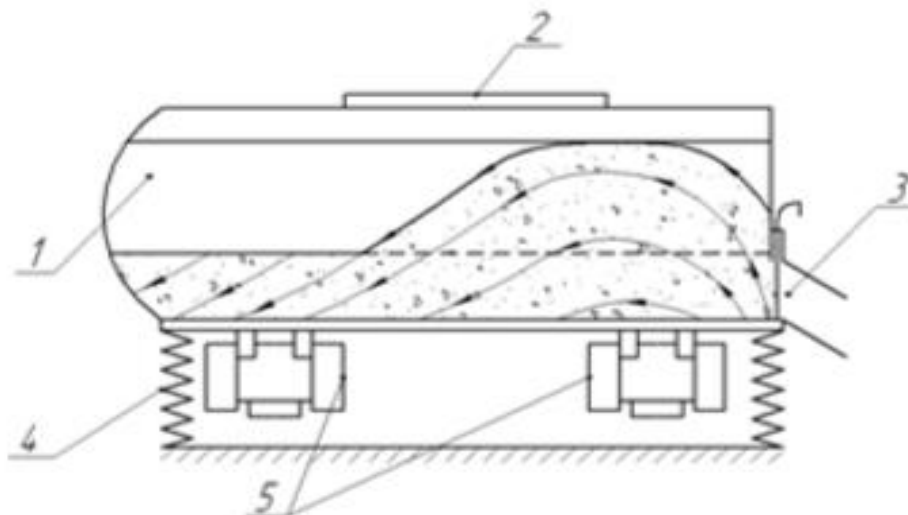


Рисунок 1.12. Конструкция вибрационного смесителя Алтайского государственного аграрного университета: 1 – цилиндрическая камера; 2 – загрузочный люк; 3 – выгрузное окно с заслонкой; 4 – амортизаторы; 5 – вибровозбудители

Анализ различных видов конструкций и модификаций вибрационных смесителей показывает, что вибрационные смесители описанных конструкций позволяет достигнуть высокой степени однородности для сыпучих материалов, даже при условии переработки сыпучих сред, существенно отличающихся дисперсным составом, физико-механическими характеристиками и концентрациями перемешиваемых компонентов. Высокая интенсивность процесса и низкая сегрегация смешиваемых компонентов выделяют вибрационные смесители из широкого спектра аппаратов для производства сухих строительных смесей.

1.3. Процесс перемешивания сыпучих смесей как объект математического моделирования

Математическая модель должна учитывать все многообразие факторов, влияющих на процесс перемешивания. Должно учитываться движение частиц различной крупности по виброожиженному слою в камере смешения в аппарате периодического действия. В аппарате непрерывного действия кроме хаотического движения частиц по слою сыпучего материала следует учитывать его движение вдоль смесителя. Математическая модель должна выдать итоговую характеристику материала, выходящего из смесителя. Модель должна учитывать тип аппарата, режимы его колебаний, производительность, физико-механические свойства сыпучей среды.

Целью математического моделирования является определение показателей работы смесителя. Однако, к сожалению, для большинства моделей выбор эффективных технологических и конструктивных параметров смесителей, обеспечивающих высокие показатели их работы, как при эксплуатации, так и при проектировании смесительного оборудования весьма затруднителен.

В качестве критерия оценки качества смешения наибольшее распространение получил коэффициент неоднородности или вариации [62]

$$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2 n_i}{n-1}}, \quad (1.1)$$

где \bar{c} - значение концентрации ключевого компонента при идеальном распределении, (%);

c_i - концентрация ключевого компонента в i пробе, (%);

n - число проб;

n_i - число проб с концентрацией c_i .

Кинетику процесса смешивания можно описать уравнением [62]:

$$V_c(t) = a V_{ch} e^{bt}, \quad (1.2)$$

где $V_c(t)$ - коэффициент неоднородности в конкретный момент времени t , (%);

$V_{сн}$ - коэффициент неоднородности в начальный момент времени t , (%);

a, b - коэффициенты, определяемые экспериментально;

t - время смешивания, (с).

Существующие модели расчета процесса перемешивания, основанные на эмпирической информации о процессе, могут использоваться лишь для конкретных аппаратов, которые работают с конкретными сыпучими компонентами и в определенных диапазонах режимных параметров эксплуатации этих аппаратов. Смена режимных параметров, изменение физико-механических свойств сыпучих материалов, изменение их концентрации, конструктивные изменения смесителей и прочее приведет к тому, что использование эмпирических моделей расчета процесса становится невозможным.

Моделируя процесс передачи вибрации в различных аппаратах по переработке сыпучих материалов (вибросмесители, вибросита, грохоты, вибротранспортеры и другие) авторы представляют сыпучую среду, как материальную точку. Такие модели, которые считаются детерминистическими, часто использовались в прошлом веке [4, 50, 56], однако они находят применение и сейчас [12 – 16, 18, 39]. Считалось, что частицы не взаимодействуют друг с другом или этим взаимодействием, можно пренебречь. Детерминистические модели существенно упрощали физическую картину движения ансамбля частиц по вибрирующей поверхности, однако они позволяли подробно рассмотреть некоторые аспекты процесса.

Усовершенствуя модель одиночной частицы разработали модель частицы с присоединенной массой [18,41]. Нижняя часть слоя материала, непосредственно контактирующая с вибрирующей поверхностью представляет собой плоское твердое тело некоторой массы, а лежащие выше части слоя тоже плоское тело другой массы. Эти тела связаны друг с другом упругими элементами малой жесткости. Такая модель, несмотря на ее простоту,

убывание средней скорости движения слоя по мере увеличения его толщины [19,41].

Модель материальной частицы с присоединенной массой силы аэродинамического сопротивления предлагается в работе [56]. Тогда дифференциальное уравнение движения частицы запишется

$$m_1 = m_0(\Delta - 1)(g + a\omega^2 \sin\omega t) + C(Re) \frac{\pi d^2 \rho_q \dot{x}}{4} \cdot 2, \quad (1.3)$$

где $m_1 = m + \dot{m}$ – эффективная масса частицы (где \dot{m} – присоединенная масса); m_0 – масса среды в объеме, равном объему частицы;

Δ – отношение средних плотностей частицы и среды;

$C(Re)$ – коэффициент давления воздуха на частицу;

Re – число Рейнольдса;

ρ_q – плотность частицы;

a, ω – амплитуда и частота колебаний поверхности;

t – время.

Для случая, когда сыпучий материал движется вместе с вибрирующей поверхностью, скользит по ней или отрывается от нее, были разработаны упруго-вязко-пластичные модели слоя сыпучей среды [56]. Предполагается, что слой материала представляет собой сосредоточенную массу, снабженную системой демпферов с коэффициентами вязкости и системой упругих элементов. Системы демпферов и упругие элементы моделируют внутренние силы, действующие в слое материала. Учитывается действие внешних сил, обусловленные наличием среды, в которой происходит движение. Эти силы моделируются при помощи еще двух демпферов, которые связаны с неподвижной системой координат x_0 и y_0 . Уравнения относительного движения слоя материала при отсутствии проскальзывания в проекции на подвижные оси координат запишутся следующим образом:

$$m\ddot{y} = -m\ddot{y}_0 - mg\cos\alpha - c_y\dot{y} - k_y y ; \quad (1.4)$$

$$m\ddot{x} = -m\ddot{x}_0 + mg\sin\alpha - c_x\dot{x} - k_x x - c_{x0}(\dot{x}_0 + \dot{x}) . \quad (1.5)$$

При проскальзывания уравнении движения вдоль подвижной оси x запишется как

$$m\ddot{x} = -m\ddot{x}_0 + mgsin\alpha - sign(\dot{x})f(k_y y + c_y \dot{y}) - c_{x0}(\dot{x}_0 + \dot{x}), \quad (1.6)$$

где f – коэффициент трения материала о вибрирующую поверхность.

При отрыве частиц от вибрирующей поверхности дифференциальные уравнения движения материала запишутся как

$$\ddot{y} + 2n_y \dot{y} = -\ddot{y}_0 - g\cos\alpha, \quad (1.7)$$

$$\ddot{x} + 2n_x \dot{x} = -\ddot{x}_0 + g\sin\alpha - 2n_x(\dot{x}_0 + \dot{x}), \quad (1.8)$$

где n_x , n_y – коэффициенты демпфирования внешних сил сопротивления перемещению слоя.

Недостатки детерминистических моделей: большое количество уравнений, описывающих движение ансамбля частиц по вибрирующей плоскости, использование данных моделей только для процессов вибрационного транспортирования сыпучих материалов с небольшой толщиной слоя, невозможность описать миграцию частиц по виброожиженному слою.

В настоящее время наряду с детерминистическими подходами для описания процессов переработки сыпучих сред используется стохастический подход. Наибольших успехов в описании процессов движения слоя сыпучего материала по вибрирующей поверхности добился Е.А. Непомнящий, сторонник вероятностного подхода к описанию процессов переработки дисперсных сред [5,6]. Считая процесс движения частиц различной крупности в среде, подверженной вибрации, марковским, Е.А. Непомнящий использовал дисперсионное уравнение для описания блуждания частицы в слое

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} - V \frac{\partial \rho}{\partial x}, \quad (1.9)$$

где ρ – плотность распределения вероятности положения частицы ключевого компонента, адекватную относительной концентрации частиц данной фракции в некоторый момент времени в некоторой точке объема виброожиженного слоя, D – коэффициент макродиффузии,

V – скорость сегрегации.

Стохастические коэффициенты учитывают как условия протекания процессов в аппаратах по переработке сыпучих материалов, так и физико-механические свойства сыпучих сред. Как правило, эти коэффициенты считаются постоянными в течение всего процесса движения частиц в аппарате.

Преобладание случайностей в поведении сыпучих сред обуславливает применения вероятностных моделей для описания процессов их переработки. Одним из замечательных математических аппаратов для описания закономерностей миграции частиц по виброожигенному слою является теория цепей Маркова, которая эффективна для моделированию широкого круга разнообразных технологических процессов.

В работах Мизонова В.Е., Федосова С.В., Жукова В.П., Огурцова В.А., Баранцевой Е.А., З. Бернотата, А. Бертъе, их учеников и последователей для описания процессов переработки дисперсных сред, теплотехнических, химических и других процессов используются ячеечные и близкие к ним модели [8, 51 – 54, 57, 58, 109 – 112, 121 – 129, 139 – 143].

Рассматривая процессы виброперемешивания, авторы [57, 58, 66, 96, 97, 109 - 112] считают, что случайные процессы доминируют в поведении ансамбля частиц, подверженному виброожигению в лопастном смесителе. Рассматривают набор частиц, участвующих в процессе смешивания, когда частицы составляют виброожигенный сыпучий слой. Слой вдоль вертикальной оси разбивают на m ячеек, которые являются ячейками идеального смешивания. Вероятности того, что частицы рассматриваемой фракции принадлежат к одной из ячеек различны. При этом эти вероятности меняются с течением времени. Таким образом, вероятность того, что частица находится в некоторой ячейке есть дискретная величина. Набор этих дискретных величин образует пространство возможных состояний системы. То есть, набор вероятностей в ячейках цепи образует вектор состояния

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_m \end{bmatrix}. \quad (1.10)$$

Фиксируются в момент времени t_k вероятности пребывания частиц рассматриваемой фракции в каждой ячейке цепи. Моменты фиксации состояния процесса будут $t_k = (k - 1)\Delta t$, $k=1,2,\dots$, где k – номер перехода – целочисленный аналог времени.

Частицы в течение времени Δt мигрируют по виброожигенному слою, переходя из одной ячейки в другие. Величина Δt выбирается достаточно малой, такой, что в течение одного перехода частицы перемещались только в соседние ячейки. Эти переходы показаны на рисунке 1.11.

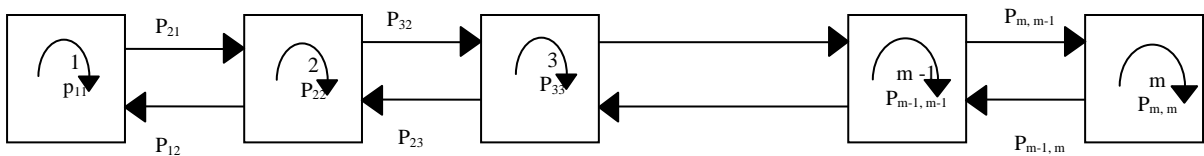


Рис 1.11. Графическое представление цепи Маркова

Через один временной переход вектор состояния изменится и станет S_i^{k+1} . Эволюция состояния цепи описывается матричным рекуррентным равенством:

$$S^{k+1} = PS^k, \quad (1.11)$$

где P – матрица переходных вероятностей, имеющая следующий вид:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & p_{32} & p_{33} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_{m-1,m-1} & p_{m-1,m} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_{m,m-1} & p_{mm} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Рекуррентное матричное равенство (1.11) позволяет рассчитывать эволюцию содержания частиц рассматриваемой фракции в ячейках цепи и описывать распределение времени пребывания частиц в смесителе, по которому можно рассчитать кинетику процесса смешивания.

Для моделирования процесса смешивания используется метод дискретных элементов (discrete element method, DEM) [136 - 138]. Этот метод представляет собой совокупность численных методов, предназначенных для расчёта движения большого количества частиц. Он позволяет рассчитывать траектории движения частиц в рабочей камере смесителя. Метод дискретных элементов есть обобщение метода конечных элементов. Метод дискретного элемента в последнее время используется для моделирования и исследования процесса смешивания. Этому способствовал рост вычислительных возможностей современных процессоров. Метод имеет существенный недостаток, он требует наличия вычислительной техники высокой производительности. Уменьшая нагрузку на компьютер, пользователи сокращают число частиц, участвующих в процессе смешения. Это приводит к искажению реальной физической картины процесса.

1.3. Выводы по главе 1. Постановка задач исследований

По настоящей главе можно сделать следующие выводы:

1. Для эффективного ведения процесса смешивания в современном производстве сухих строительных смесей применяются аппараты различных конструкций и модификаций. Однако в последнее время особое внимание уделяется вибрационным смесителям с источниками возбуждения малой мощности, когда вибрацию рабочего органа миксера можно осуществлять в окколорезонансном режиме.
2. Теория вибрационного смешивания, которая описывает кинетику процесса в аппаратах периодического и непрерывного принципа действия, учитывающую параметры колебаний смесительной камеры, далека от завершения.
3. Смешивание конкретных сыпучих материалов должно проводиться при режиме вибрации, который обеспечивает максимальные показатели работы смесителя.
4. Наиболее перспективным подходом для описания процесса вибрационного смешивания сыпучих материалов следует признать вероятностный подход, использующий математический аппарат теории цепей Маркова. Моделирование закономерностей перемешивания, основанное на широких возможностях данного подхода, позволяет учитывать многообразие факторов, определяющих протекание процесса вибрационного перемешивания сыпучих материалов.

Поэтому в работе были поставлены следующие задачи исследования.

1. На основе теории цепей Маркова разработать математические модели формирования качества смесей сыпучих сред в вибрационных смесителях периодического и непрерывного принципов действия, учитывающих параметры вибровоздействия аппарата на сыпучую среду.
2. Выполнить экспериментальные исследования процессов фракционирования и смешивания различных компонентов с помощью лабораторных установок периодического принципа действия для определения стохастических параметров моделей и верификации с опытными данными.

3. Провести проверку адекватности разработанных моделей по локальным и интегральным характеристикам процесса смешивания.
4. Определить параметры вибрационного воздействия на смешиваемые компоненты, обеспечивающие повышение качества смесей.
5. Реализовать расчетно-экспериментальные исследования процесса смешивания в промышленных условиях.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ВИБРАЦИОННЫХ СМЕСИТЕЛЯХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО И НЕПРЕРЫВНОГО СПОСОБА ДЕЙСТВИЯ

Математическая модель процесса перемешивания, как и реальный смеситель должна преобразовывать входные характеристики сыпучей среды в выходные. Компоненты, подаваемые в смеситель, обладают множеством физико-механических свойств. Это характеристика крупности сыпучих материалов, твердость, упругость, форма зерен и другие свойства. Эти факторы определяют как процесс движения частиц друг относительно друга по высоте виброоживленного слоя, так и процесс их взаимных соударений. Движение частиц в слое так же зависит от параметров колебаний рабочей камеры смесителя. Процесс во многом зависит от способа перемешивания. Его результаты определяются типом аппарата, наличием дополнительных устройств, производительностью. Выходной характеристикой работы смесителя является качество процесса перемешивания. Математическая модель должна учитывать все многообразие факторов, определяющих результаты процесса перемешивания.

При описании миграции частиц по виброоживленному слою будем условно считать смесь двухкомпонентной. Выделим один компонент (будем называть его ключевым), а все остальные компоненты объединим во второй условный компонент, который будем считать сыпучей средой, в которой происходит распределение ключевого компонента в процессе перемешивания. Математическая модель описывает закономерности миграции частиц ключевого компонента в виброоживленной среде. Если реальная смесь состоит из трех или более компонентов, то, рассмотрев движение частиц первого компонента в виброоживленном слое, в качестве ключевого компонента берется условно второй компонент, а все остальные компоненты – среда. При этом математическая модель описывает миграцию частиц второго компонента в сыпучей среде. Далее моделируется движение третьего компо-

нента в сыпучей среде. Заранее следует оговорить, что стохастические коэффициенты модели у каждого компонента свои, определение которых будет рассмотрено ниже.

2.1. Построение математической модели процесса периодического смешивания в вибрационном смесителе

В основу моделирования положен математический аппарат теории цепей Маркова, широко используемый для описания процессов в дискретных средах Мизоновым В.Е., Федосовым С.В., Огурцовым В.А., Баранцевой Е.А., Митрофановым А.В. их учениками и последователями [8, 17, 23, 25, 29 – 37, 44 – 46, 109 – 115, 139 -147].

Миксер представляет собой массив из n ячеек идеального смешения одинаковой высоты Δx . Схематично рабочий объем смесителя и возможные направления и вероятности переходов из одной ячейки цепи в другую изображены на рисунке 2.1.

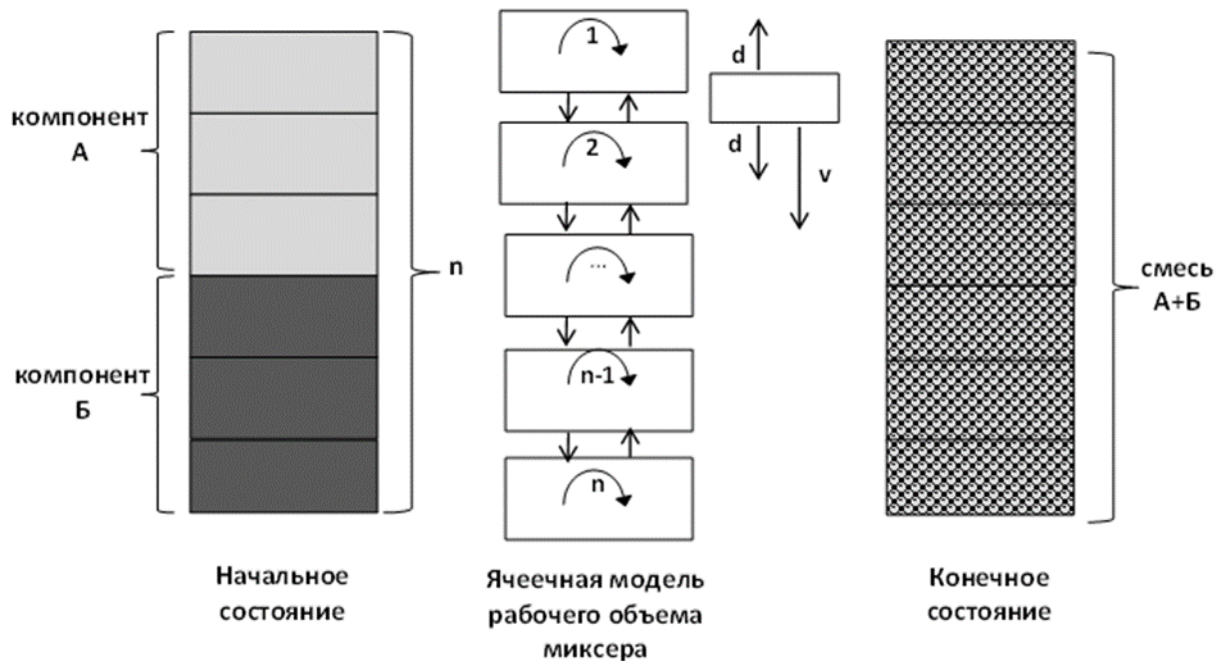


Рисунок 2.1. Схема ячейной модели периодического смешивания

Состояние процесса фиксируется в дискретные моменты времени $t_k=(k-1)\Delta t$, где Δt - длительность одного перехода, k - номер перехода, т.е. дискретный аналог времени. В течение одного временного перехода Δt разрешены переходы только в соседние друг с другом ячейки цепи. Распределение частиц ключевого компонента смеси по ячейкам можно представить вектором-столбцом S :

$$S = \begin{pmatrix} S_1 \\ \dots \\ S_{j-1} \\ S_j \\ S_{j+1} \\ \dots \\ S_n \end{pmatrix} . \quad (2.1)$$

Тогда два последовательных состояния системы S^k и S^{k+1} связаны матричным равенством, описывающим кинетику процесса смешивания:

$$S^{k+1} = P * S^k , \quad (2.2)$$

где P – матрица переходов размером $n \times n$, которая зависит от текущего вектора состояния и строится по следующим правилам. Переходы из верхних ячеек цепи в нижние возможны только при условии наличия свободного объема в нижних ячейках, что делает модель нелинейной. В общем случае, матрица P будет иметь вид:

$$P = \begin{pmatrix} 1 - d - v(1 - S_1^k) & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ v(1 - S_1^k) & 1 - 2d - v(1 - S_2^k) & d & \dots & 0 & 0 \\ 0 & v(1 - S_2^k) + d & 1 - 2d - v(1 - S_3^k) & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 - 2d - v(1 - S_{n-1}^k) & d \\ 0 & 0 & 0 & \dots & v(1 - S_{n-1}^k) & 1 - 2d - v(1 - S_n^k) \end{pmatrix} , \quad (2.3)$$

где d – вероятность диффузионного перехода, v – вероятность сегрегации компонента. Вероятность перехода из ячейки с номером j в ячейку с номером $j+1$ равна $v(1 - S_{j+1}^k) + d$ и учитывает тот факт, что способность ячейки принять компонент смеси ограничена свободным объемом этой ячейки. Принято, что максимальное количество смеси, вмещаемое ячейкой, равно 1.

Таким образом, на каждом переходе матрица P осуществляет перераспределение ключевого компонента смеси.

Предполагая, что диффузионный перенос подчинен закону Фика, вероятности диффузионных переходов рассчитываются по формулам

$$d = D \frac{\Delta t}{\Delta x^2}, \quad (2.4)$$

где D – коэффициент макродиффузии в соответствующем направлении, Δx – размер прямоугольной ячейки. Вероятности конвективных переходов определяются формулой

$$v = V \frac{\Delta t}{\Delta x}, \quad (2.5)$$

где V – скорость сегрегации ключевого компонента.

Для оценки текущего состояния качества смеси было использовано стандартное среднеквадратичное отклонение от идеального распределения компонентов смеси:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (S_{ij} - \bar{S}_i)^2}, \quad (2.6)$$

Исследуем численно влияние параметров процесса смешивания на качество смеси и кинетику ее формирования.

При отсутствии сегрегации, когда частицы ключевого компонента смеси не отличаются от частиц основного компонента ни плотностью, ни размером, имеет место лишь диффузионный процесс, который заканчивается в конечном итоге идеальным перемешиванием (ключевой компонент равномерно распределен в основном). С ростом диффузионного коэффициента происходит интенсификация процесса смешивания, в результате чего равномерность распределения ключевого компонента смеси достигается быст-

рее. На рисунках 2.2 – 2.4 проиллюстрированы примеры влияния диффузионной составляющей вероятности перехода из ячейки в ячейку на эволюцию состояния смеси при отсутствии сегрегации ($v=0$) для цепи из четырех ячеек.

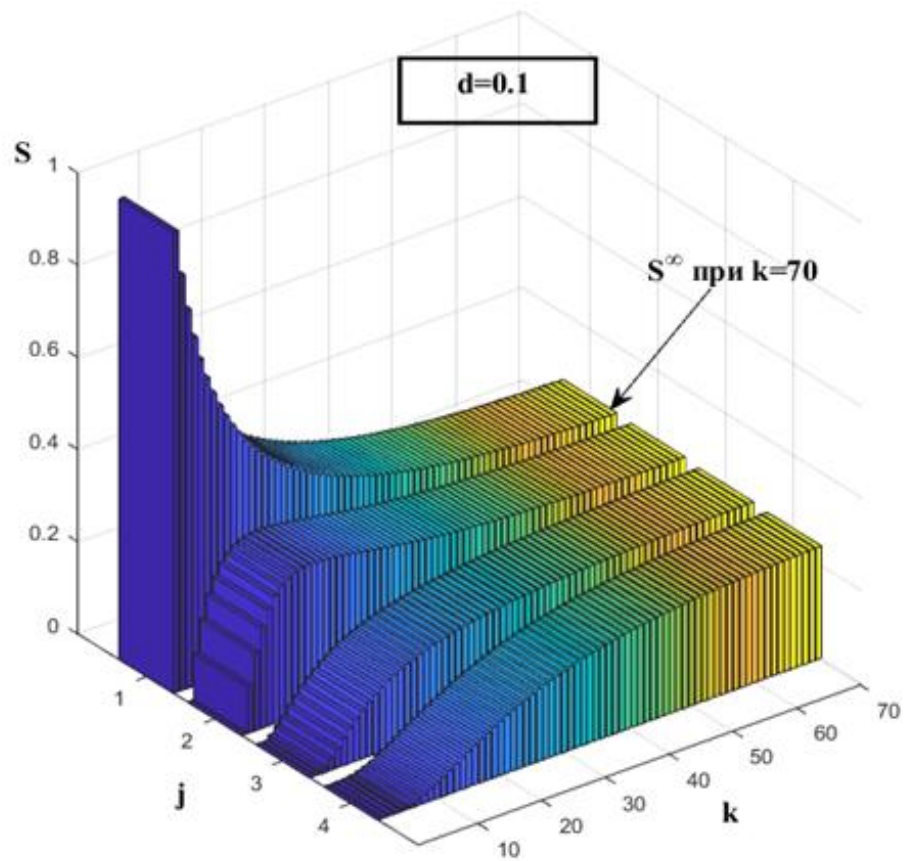


Рисунок 2.2. Эволюция состояния смеси при отсутствии сегрегации ($v=0$) при коэффициенте диффузии $d=0,1$

В начальный момент времени ключевой компонент подается в первую ячейку слоя. Всего в слое четыре ячейки.

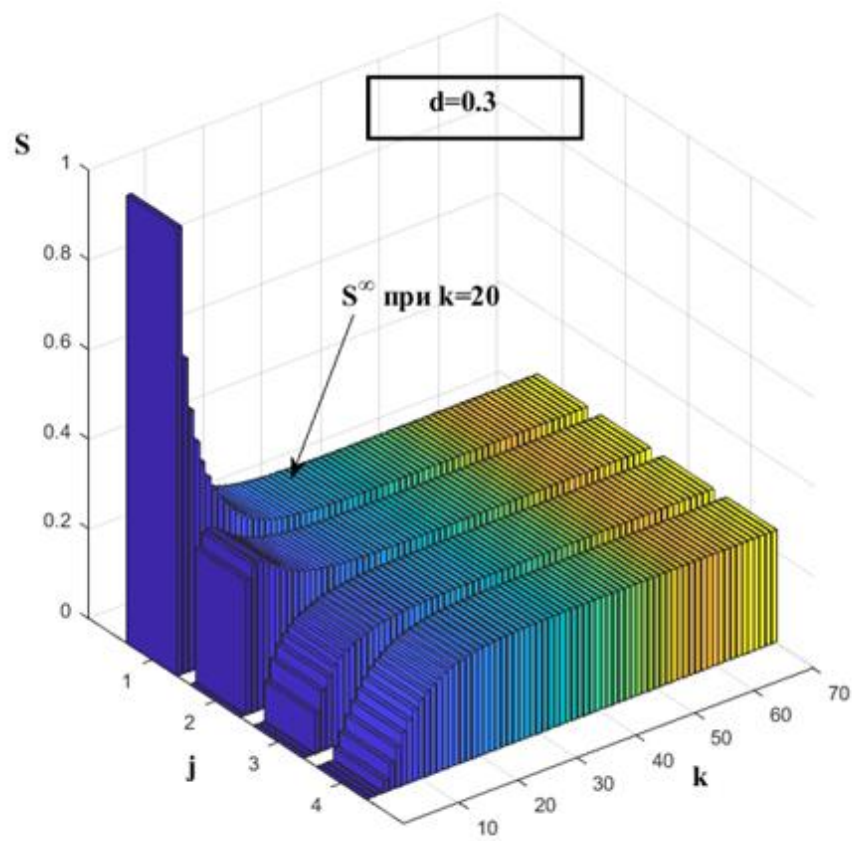


Рисунок 2.3. Эволюция состояния смеси при отсутствии сегрегации ($v=0$) при коэффициенте диффузии $d=0,3$

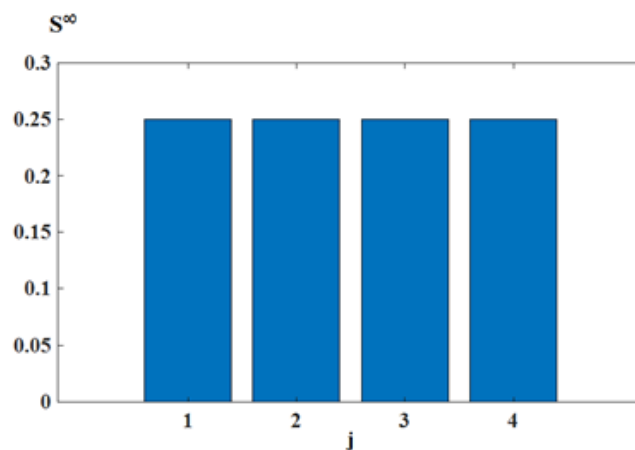


Рисунок 2.4. Асимптотическое состояние концентрации частиц ключевого компонента в смеси

При наличии сегрегации асимптотическое распределение, к которому «сходятся» распределения ключевого компонента по ячейкам, уже не

является равномерным. Чем больше степень сегрегации, тем более неравномерным оказывается распределение в результате, со смещением в сторону действия сегрегации (рисунки 2.5 – 2.8).

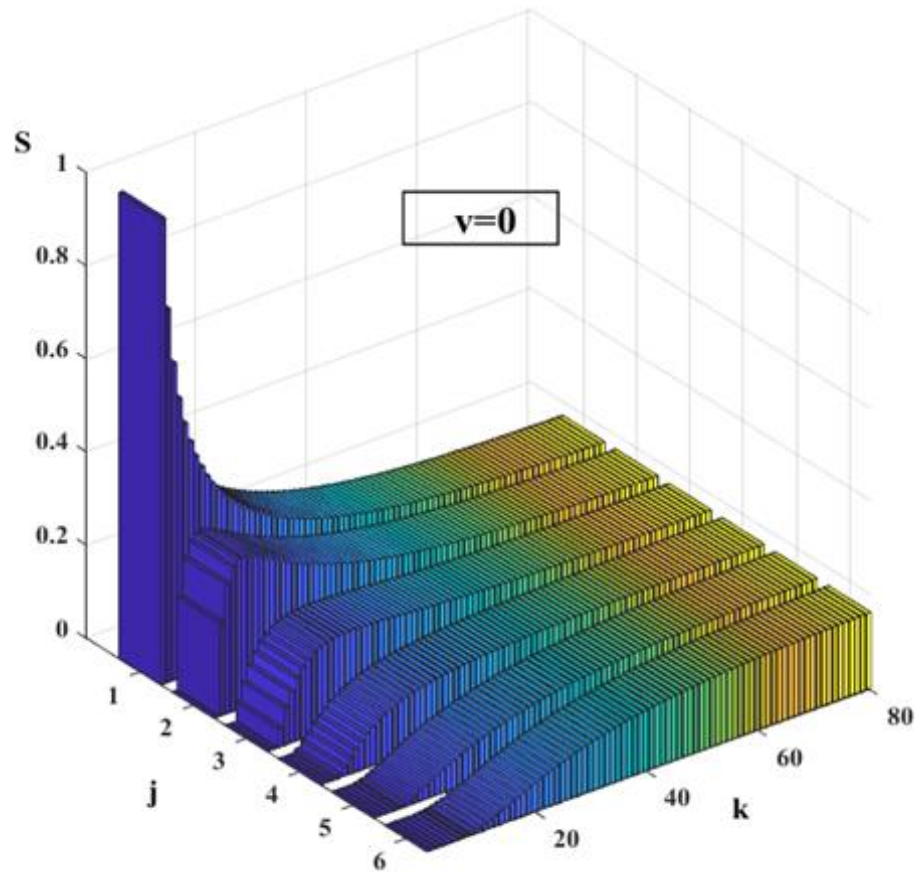


Рисунок 2.5. Эволюция состояния смеси при вероятности сегрегации $v=0$ и коэффициенте диффузии $d=0.2$

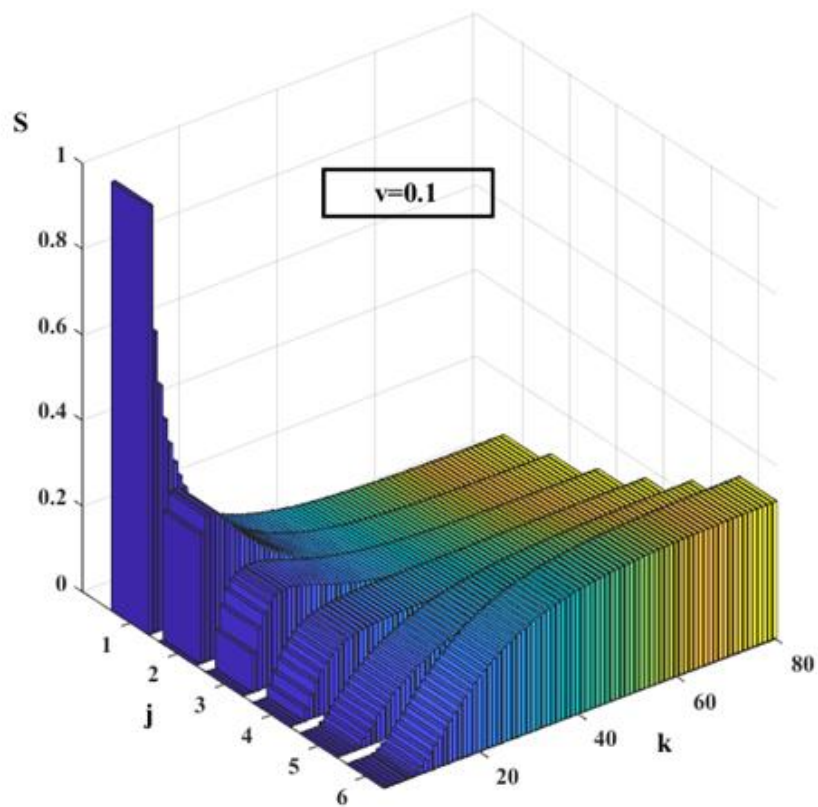


Рисунок 2.6. Эволюция состояния смеси при вероятности сегрегации $v=0,1$ и коэффициенте диффузии $d=0.2$

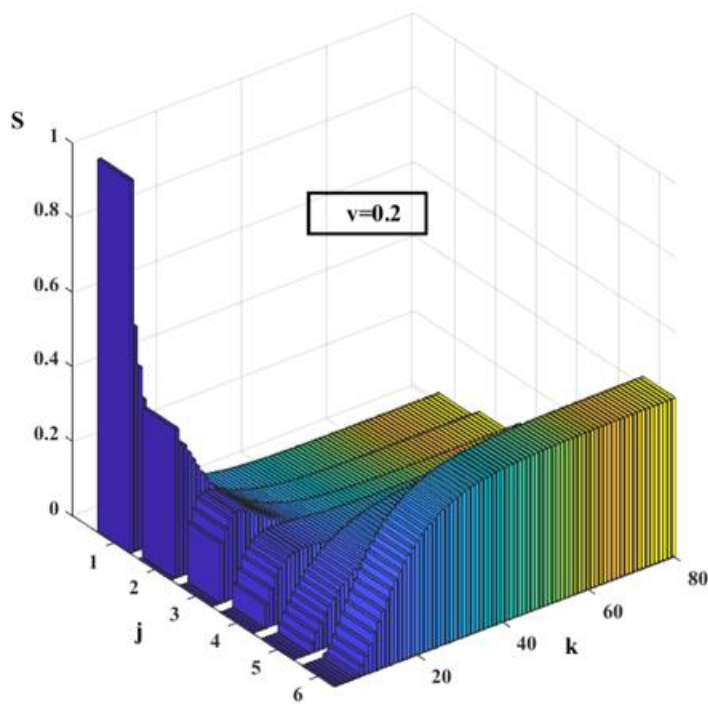


Рисунок 2.7. Эволюция состояния смеси при вероятности сегрегации $v=0,2$ и коэффициенте диффузии $d=0.2$

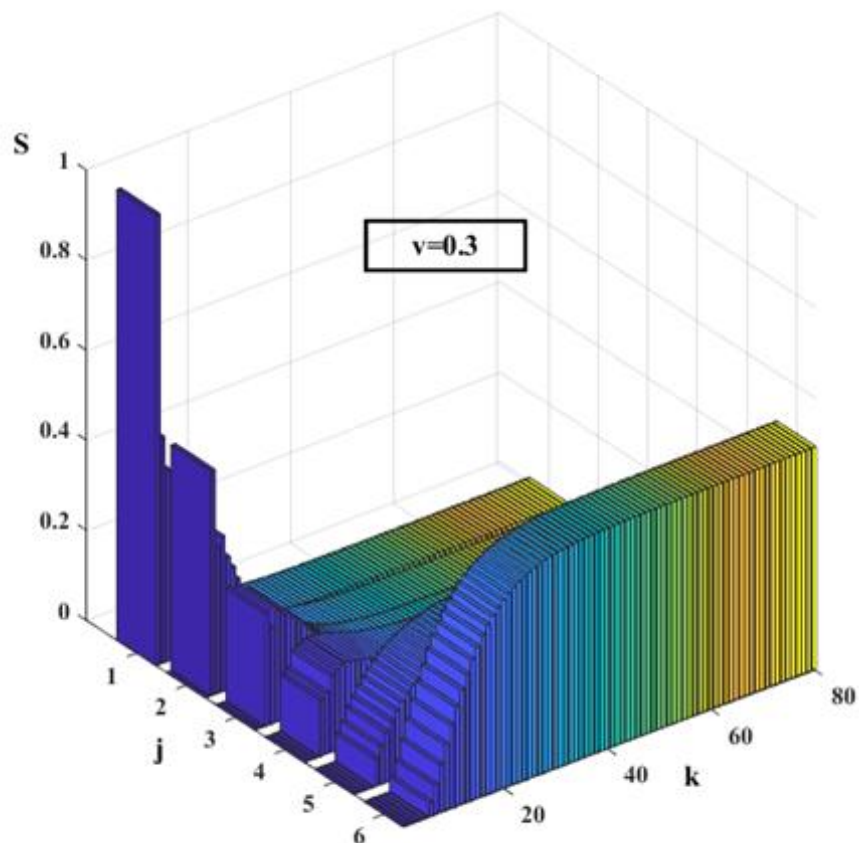


Рисунок 2.8. Эволюция состояния смеси при вероятности сегрегации $v=0,3$ и коэффициенте диффузии $d=0.2$

На рисунках 2.5 – 2.8 показано влияние безразмерной скорости сегрегации v на качество формируемой бинарной смеси для цепи из шести ячеек, начальное положение ключевого компонента - в первой ячейке цепи.

Оценим влияние параметров модели (безразмерной скорости сегрегации v и безразмерного коэффициента диффузии d) на качество формируемой смеси. Эволюцию неоднородности смеси удобно наблюдать, используя среднеквадратичное отклонение текущего состояния смеси от идеального состояния, выраженное формулой (2.6).

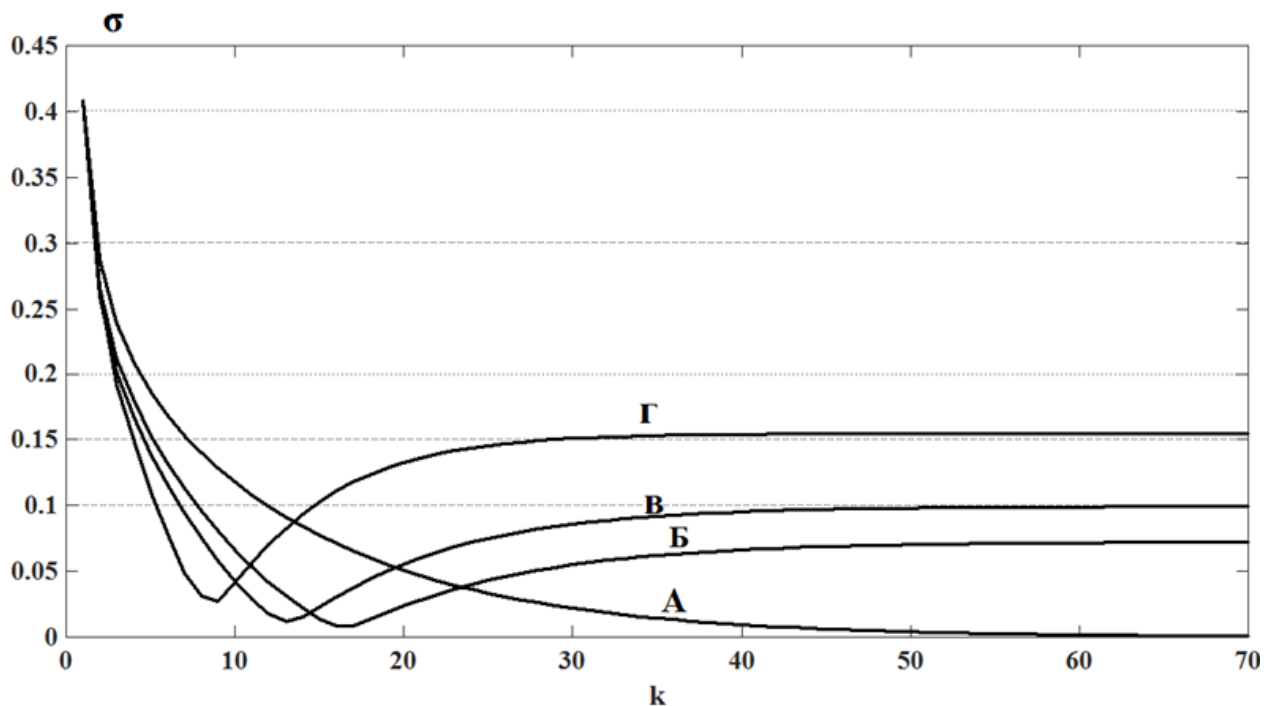


Рисунок 2.9. Эволюция неоднородности смеси: А – $v=0$; Б – $v=0.1$;
В – $v=0.15$; Г – $v=0.3$ ($d=0.3$; $n=6$)

При отсутствии сегрегации ($v=0$), как было уже отмечено выше, асимптотически ключевой компонент равномерно распределен в основном, $\sigma \rightarrow 0$. При ненулевой сегрегации среднеквадратичное отклонение содержания ключевого компонента достигает минимума, с ростом v значение этого минимума смещается влево (т.е. по времени этот момент наступает раньше), но его величина становится больше, что говорит об ухудшении качества смеси.

При небольшой сегрегации $v=0.1$ и отсутствии диффузии минимум неоднородности смеси достигается при 34 переходах. При увеличении d минимум неоднородности становится меньше и смещается влево, т.е. достигается быстрее (рисунок 2.10).

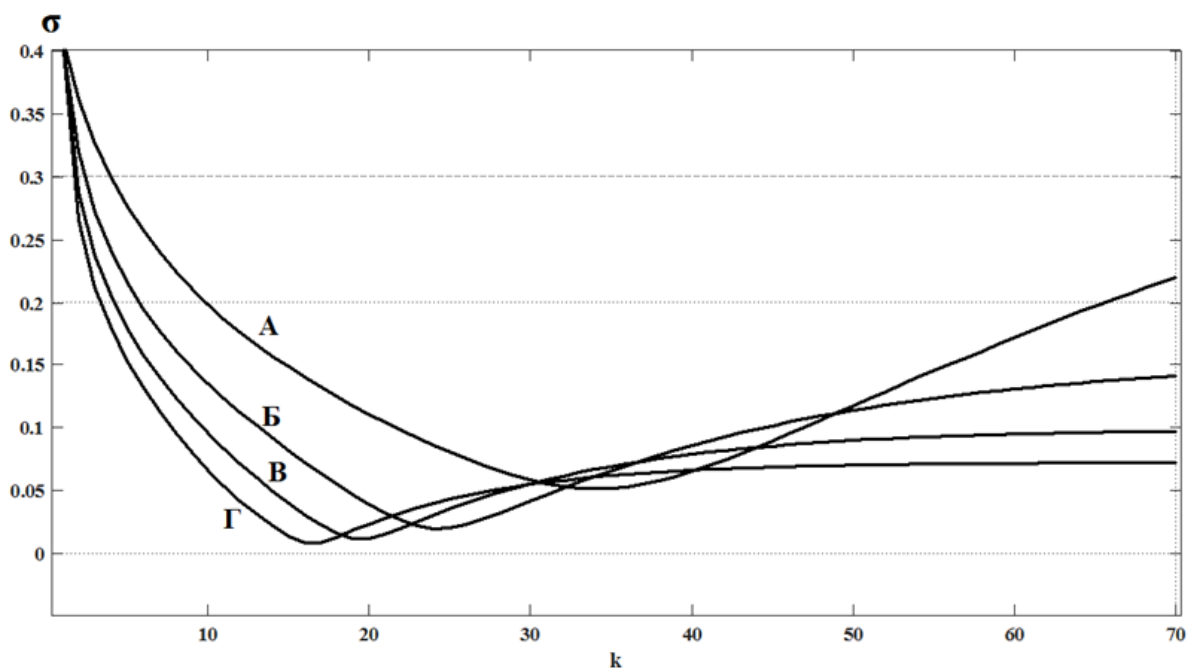


Рисунок 2.10. Влияние параметра d на кинетику и качество получаемой смеси: А - $d=0$; Б - $d=0.1$; В - $d=0.2$; Г - $d=0.3$ ($v=0.1$; $n=6$)

Таким образом, изменяя параметры v и d можно воздействовать на кинетику и качество формирования смеси.

Результаты некоторых численных экспериментов с моделью приведены ниже. На рисунке 2.11 показаны состояния компонентов бинарной смеси в различные моменты времени, ключевой компонент занимает две верхние ячейки. Концентрация другого компонента – среды определяется из условия равенства единице суммы относительных концентраций первого и второго компонентов. Как видно из диаграмм, достижение идеального распределения компонентов при наличии сегрегации невозможно. Смесь достигает наилучшего состояния перемешивания к определенному моменту времени. Если проводить процесс перемешивания бесконечно долго, то сегрегация окажет негативное воздействие на процесс, степень равномерности смеси будет низкой. Это доказывает существование оптимального значения времени перемешивания в реальном смесителе периодического действия.

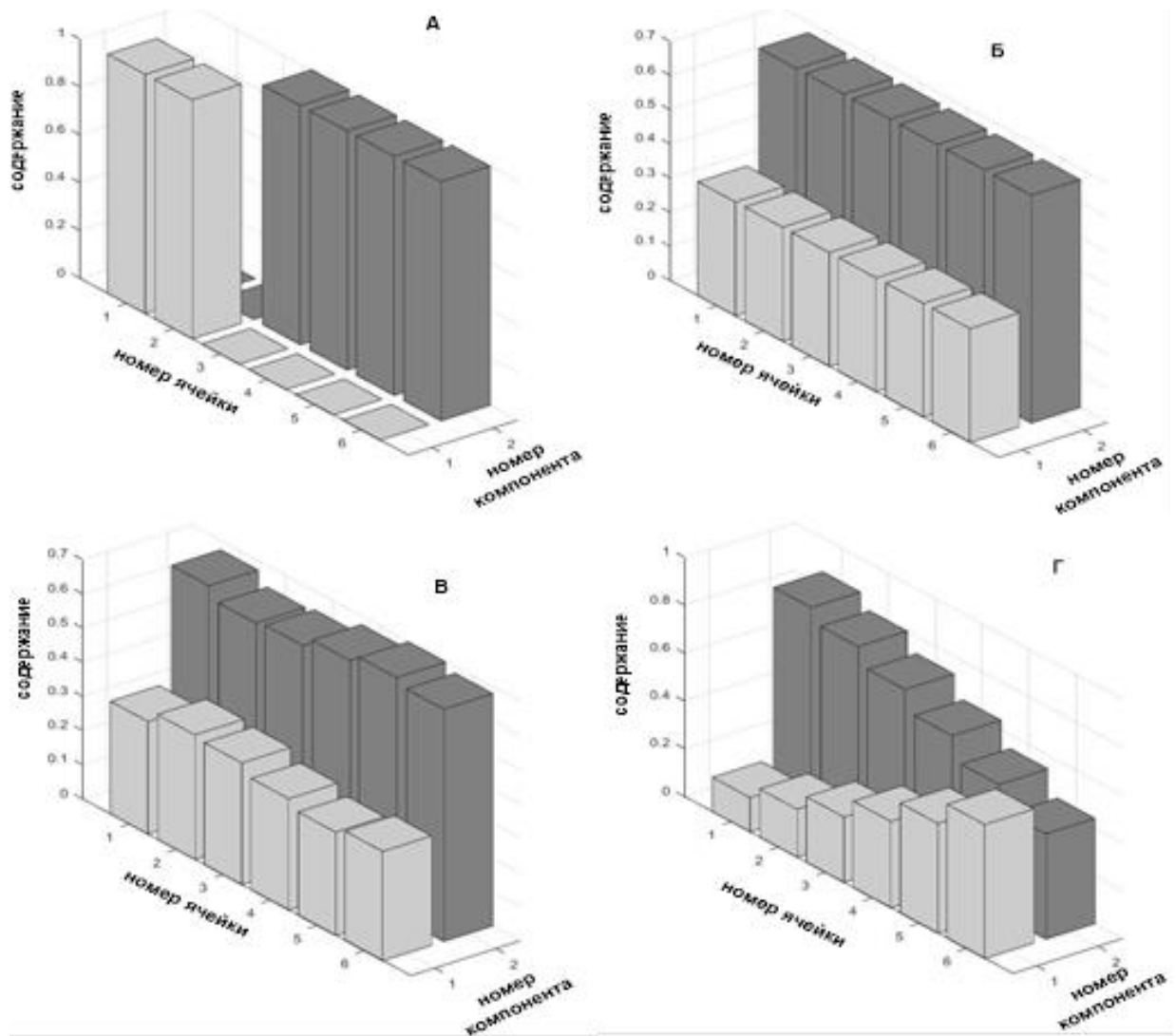


Рисунок 2.11. Состояния компонентов бинарной смеси в различные моменты времени: А – исходное состояние ($k=0$), Б – идеальная смесь (достижимо только при отсутствии сегрегации), В – наилучшее состояние смеси с точки зрения однородности, достижимое в определенный момент времени, Г – асимптотическое состояние ($k \rightarrow \infty$)

2.2. Модель непрерывного смешивания в вибрационном смесителе

В настоящем разделе предлагается дальнейшее развитие стохастической модели кинетики вибрационного перемешивания. Одномерная модель относится только к миграции частиц поперек виброоживленного слоя сыпучего материала. Если эту модель использовать для описания процесс непрерывного перемешивания, то необходимо сделать допущение о том, что поток сыпучего материала движется вдоль рабочей камеры смесителя без продольного перемешивания или, по крайней мере, перемешивание происходит в продольном направлении гораздо медленнее, чем в поперечном. При интенсивном вибрационном воздействии на сыпучий материал со стороны смесителя такое допущение может значительно исказить структуру реального процесса и привести к ошибкам в расчетах основных показателей процесса. Одномерные ячеечные модели исчерпывают свои возможности при рассмотрении периодического смешивания. При непрерывном процессе она скорее качественно, чем количественно отражают закономерности движения частиц, проходящих в пространстве.

На рисунке 2.12 представлена двумерная ячеечная модель процесса смешения.

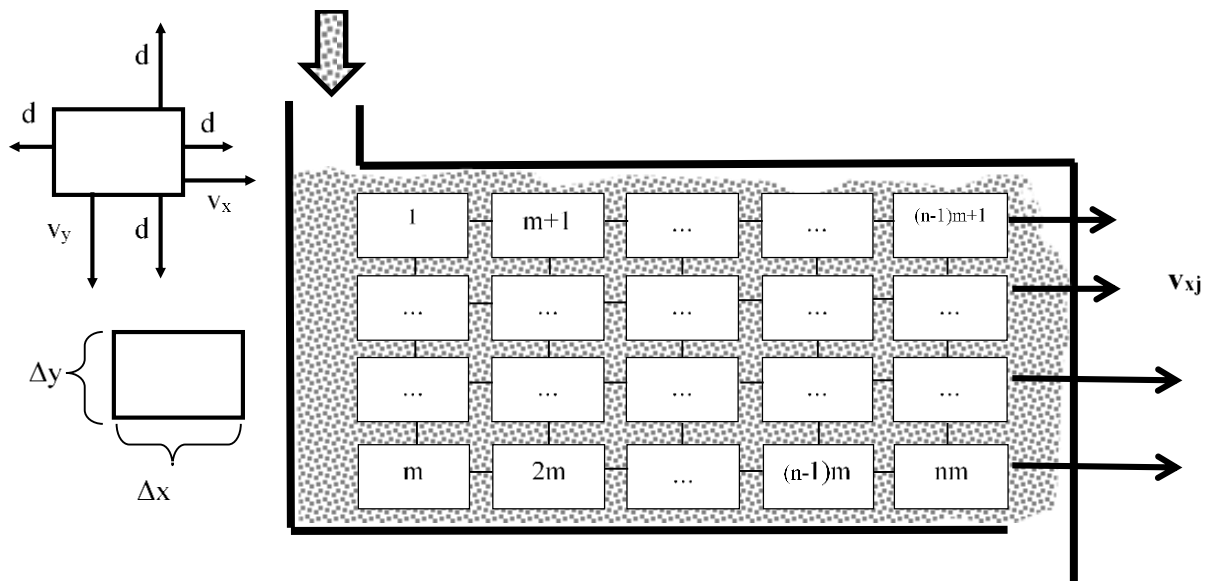


Рисунок 2.12. Двумерная ячеечная модель рабочего объема смесителя и направления выхода материала из ячейки

Двухмерная модель смешения позволяет исследовать больше эффектов процесса и учитывать истинную картину явлений, происходящих при перемешивании сыпучих материалов в реальном промышленном аппарате, чем это позволяет одномерная модель.

В основу моделирования положена теория цепей Маркова. Рабочий объем смесителя представлен двумерным массивом ячеек идеального смешения. Размерность массива ячеек равна $m \times n$, количество столбцов n фиксировано, а число строк m может меняться в зависимости от уровня загрузки смесителя материалом. Направления переходов из одной ячейки цепи в другую и соответствующие переходам вероятности изображены на рисунке 2.12.

Считаем, что процесс транспортирования материала вдоль смесителя может происходить при равных скоростях движения соответствующих слоев.

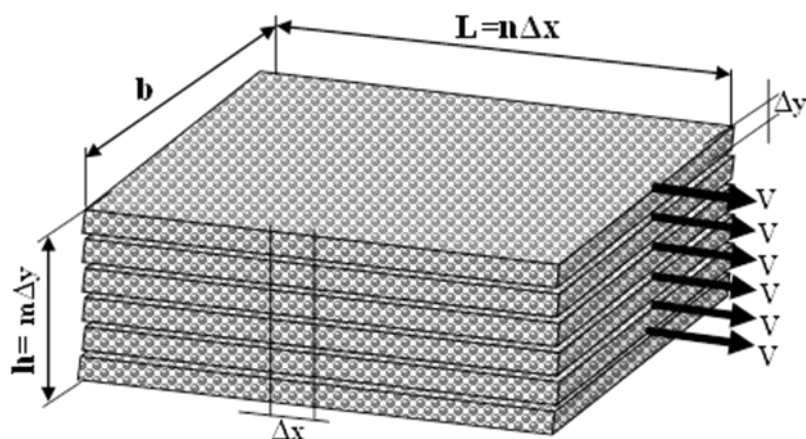


Рисунок 2.13. Структура потока материала в смесителе

Пусть длина смесителя в продольном направлении равна L , число ячеек в продольном направлении фиксировано и равно n , длина одной ячейки Δx (рисунок 2.13). Тогда очевидно, что длина одной ячейки

$$\Delta x = \frac{L}{n}. \quad (2.6)$$

Число слоев – m . Высота загрузки аппарата материалом равна h . Высота одной ячейки (слоя) – Δy определится как

$$\Delta y = \frac{h}{m}. \quad (2.7)$$

Пусть b – ширина смесителя. Масса сыпучего материала находящегося в смесителе

$$M = (L \cdot b \cdot h) \cdot \rho, \quad (2.8)$$

где ρ – средняя плотность сыпучего материала.

Массовый расход сыпучего материала, проходящего через смеситель

$$Q = (b \cdot h) \cdot \rho \cdot V_x, \quad (2.9)$$

где V_x – скорость транспортирования материала по рабочей камере смесителя, которая определится как

$$V_x = L \frac{Q}{M}. \quad (2.10)$$

Таким образом, скорости движения V_x могут быть найдены из полученной экспериментально зависимости разгрузочной характеристики смесителя от его производительности $M = f(Q)$, которая в первом приближении может считаться линейной и легко определяется как

$$M = kQ, \quad (2.11)$$

где k – коэффициент пропорциональности равный времени пребывания порции сыпучего материала в смесителе.

Распределение содержания ключевого компонента по ячейкам в некоторый момент времени может быть представлено вектором-столбцом

$$S = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_m \\ S_{m+1} \\ \dots \\ S_{m+m} \\ \dots \\ S_{(n-1)m+1} \\ \dots \\ S_{nm} \end{pmatrix} . \quad (2.12)$$

Нумерация элементов вектора-столбца совпадает с нумерацией ячеек, показанной на рис.2.12. Первые m элементов вектора S_1, S_2, \dots, S_m соответствуют первому столбцу ячеек модели, последующие m элементов $S_{m+1}, S_{m+2}, \dots, S_{2m}$ соответствуют второму столбцу ячеек, и так далее, последние m элементов вектора $S_{(n-1)m+1}, S_{(n-1)m+2}, \dots, S_{nm}$ соответствуют последнему столбцу ячеек модели.

Состояние процесса рассматривается в моменты времени $t_k=(k-1)\Delta t$, где Δt – продолжительность, k – номер временного перехода (аналог текущего времени). В течение перехода Δt частицы из данной ячейки могут перейти только в соседние с ней ячейки, но не далее.

Эволюция состояния смеси описывается следующим матричным равенством

$$S^{k+1} = PS^k, \quad (2.13)$$

где P – матрица переходов, элементами которой являются вероятности переходов материала из ячейки в ячейку, строится по следующим правилам. На главной диагонали матрицы переходных вероятностей стоят p_s - доли ключевого компонента, оставшиеся в ячейке за один переход и равные разности единицы и суммы вероятностей переходов из этой ячейки в соседние ячейки.

Вероятности на главной диагонали рассматриваемой матрицы в соответствии с определением вероятности должны быть неотрицательны, в противном случае время одного перехода Δt должно быть уменьшено до тех пор, пока условие неотрицательности не станет выполняться. Верхний левый и нижний правый углы матрицы переходных вероятностей для случая $m=3$ показаны ниже:

$$P = \begin{pmatrix} p_s & d & 0 & d & 0 & 0 & \dots \\ d + v_y & p_s & d & 0 & d & 0 & \dots \\ 0 & d + v_y & p_s & 0 & 0 & d & \dots \\ v_{x1} & 0 & 0 & p_s & d & 0 & \dots \\ 0 & v_{x2} & 0 & d + v_y & p_s & d & \dots \\ 0 & 0 & v_{x3} & 0 & d + v_y & p_s & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & p_s & d & 0 \\ \dots & d + v_y & p_s & d \\ \dots & 0 & d + v_y & p_s \\ \dots & v_{x1} & 0 & 0 \\ \dots & 0 & v_{x2} & 0 \\ \dots & 0 & 0 & v_{x3} \end{pmatrix}, \quad (2.14)$$

Предполагая, что диффузионный перенос подчинен закону Фика, вероятности диффузионных переходов рассчитываются по формулам

$$d_x = D_x \frac{\Delta t}{\Delta x^2}, \quad d_y = D_y \frac{\Delta t}{\Delta y^2}, \quad (2.15)$$

где D – коэффициент макродиффузии в соответствующем направлении, Δx и Δy – размеры прямоугольной ячейки. В дальнейшем в примерах, иллюстрирующих работоспособность модели, рассматривались квадратные ячейки, когда $\Delta x = \Delta y$ и $d_x = d_y = d$, использование которых является наиболее распространенным случаем моделирования [128]. Вероятности конвективных переходов определяются формулами

$$v_x = V_x \frac{\Delta t}{\Delta x}, \quad v_y = V_y \frac{\Delta t}{\Delta y}, \quad (2.16)$$

где V_x - скорость движения материала в смесителе, V_y - скорость сегрегации ключевого компонента.

Рекуррентное матричное равенство (2.13) позволяет рассчитывать выход ключевого компонента из смесителя за один переход:

$$q(k) = \sum_{(n-1)m+1}^{nm} S_{nj}^k v_{xj} \quad (2.17)$$

При расчетах с моделью ключевой компонент непрерывно подавался в левую верхнюю ячейку с производительностью единица массы за переход. Процесс считался установившимся, если суммарный выход из ячеек последнего столбца за переход, рассчитанный по формуле (2.17), приближался к единице. Для оценки качества смеси на выходе было использовано стандартное среднеквадратичное отклонение от равномерного распределения содержания ключевого компонента в ячейках последнего столбца:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(S_{nj}^i - \frac{1}{m} \right)^2} \quad (2.18)$$

Вектор состояния S , описанный формулой (2.11), для наглядности представления результатов численных экспериментов иначе может быть записан в виде матрицы состояния системы:

$$S = \begin{pmatrix} S_1 & S_{m+1} & \cdots & S_{(n-1)m+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_m & S_{m+m} & \cdots & S_{nm} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Пример эволюции начального состояния при наличии только диффузионных переходов приведен на рисунке 2.14. В рассматриваемом примере несегрегирующий ключевой компонент с течением времени из состояния

$$S^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

трансформируется в состояние

$$S^{100} = \begin{pmatrix} 0.0235 & 0.0459 & 0.0897 & 0.1773 \\ 0.0233 & 0.0455 & 0.0889 & 0.1757 \\ 0.0230 & 0.0451 & 0.0881 & 0.1741 \end{pmatrix}. \quad (2.21)$$

Число рядов ячеек (слоев материала) $m=3$, число столбцов $n=4$.

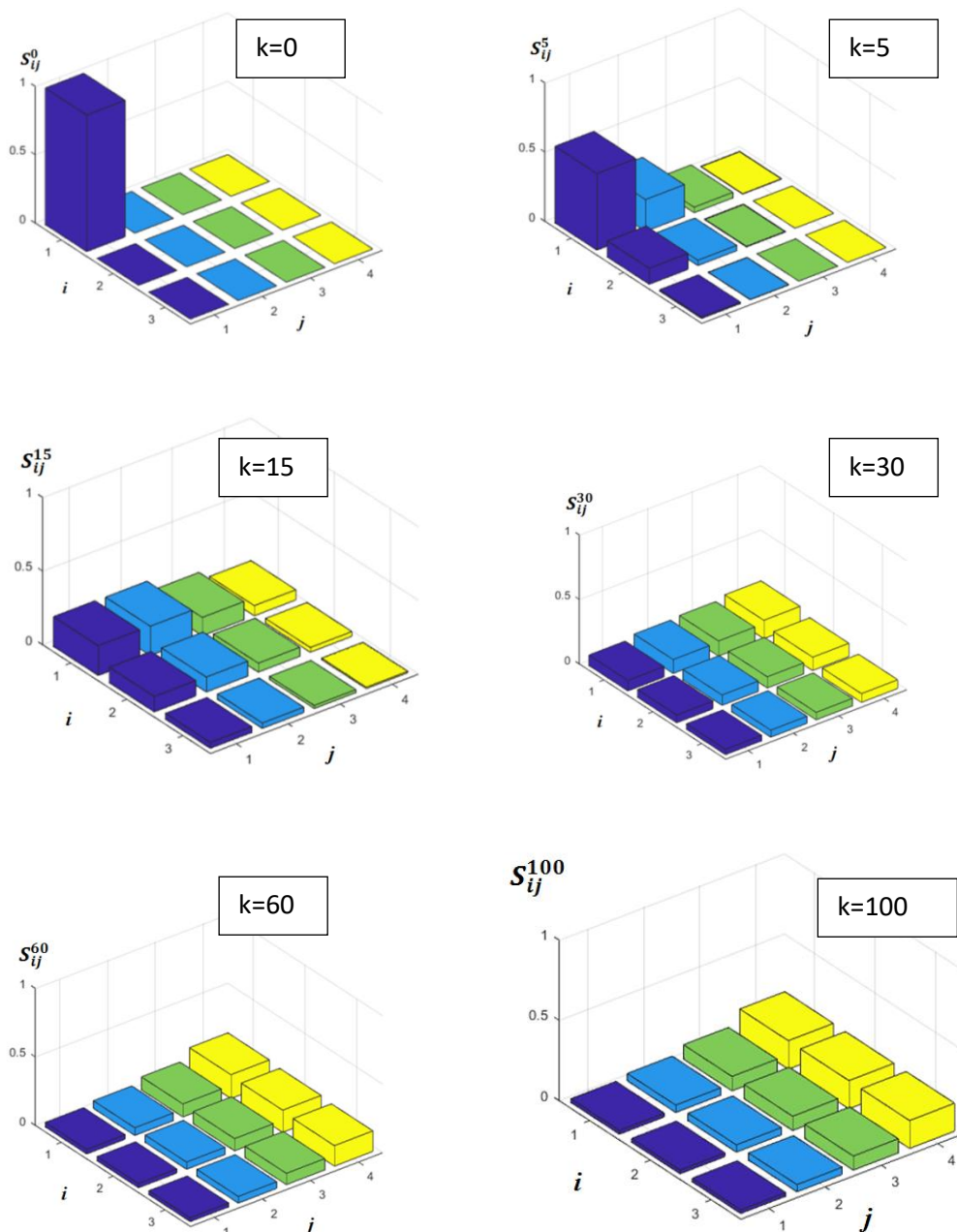


Рисунок 2.14. Пример эволюции начального состояния при $d=0.05$; число слоев $m=3$, число столбцов $n=4$, отсутствие сегрегации $v_y=0$, скорость потока $v_x=0.1$

Легко видеть, что ключевой компонент смещается вправо и вниз по сетке ячеек и асимптотически распределяется по ячейкам цепи, с тенденцией равномерного накопления ключевого компонента в ячейках последнего столбца. В этом случае на выходе из смесителя (в ячейках последнего столбца) получается смесь практически наивысшего качества.

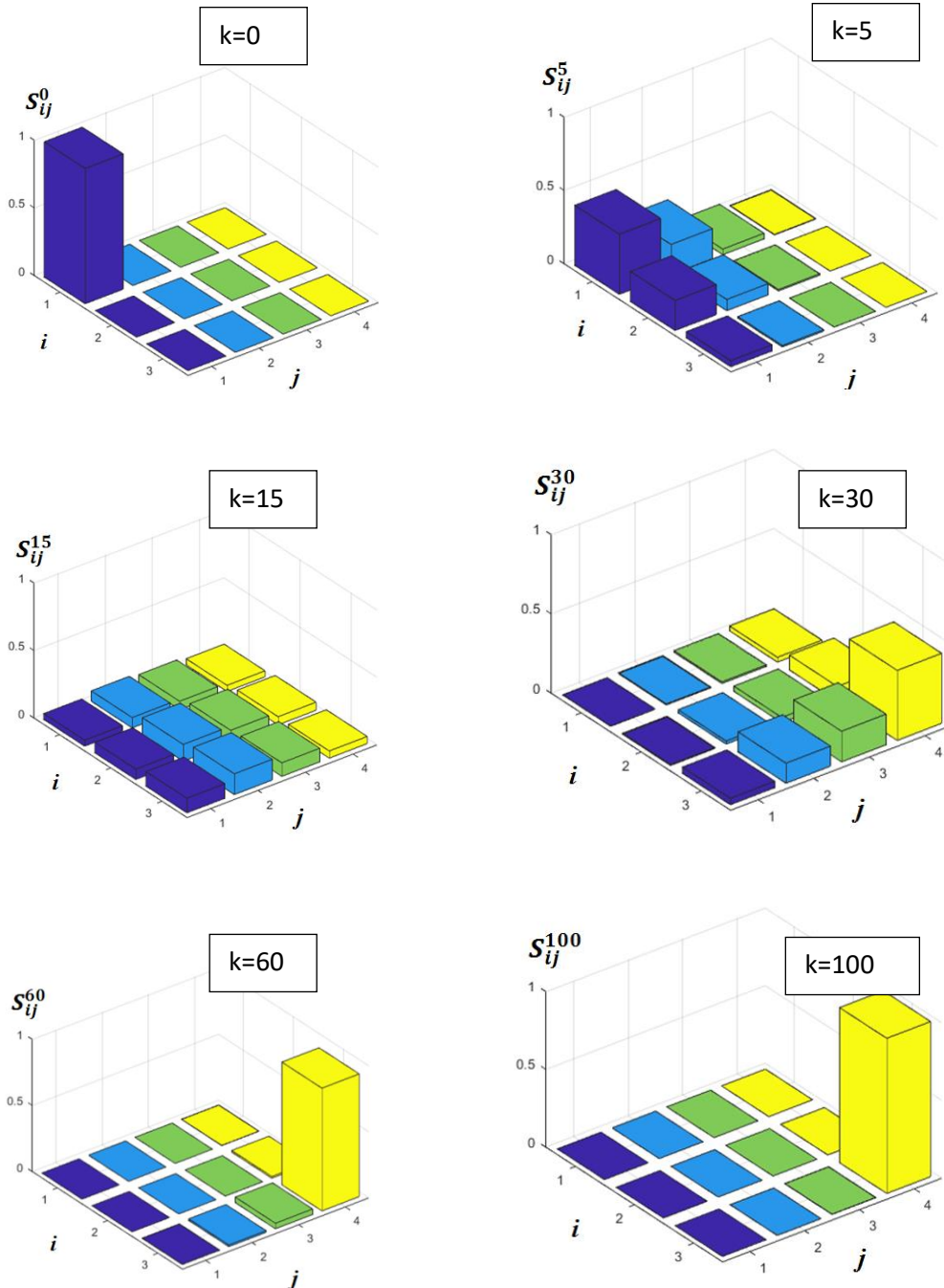


Рисунок 2.15. Пример эволюции начального состояния при $d=0$; число слов $m=3$, число столбцов $n=4$, скорость сегрегации $v_y=0.1$ и скорость потока

$$v_x=0.1$$

При наличии сегрегации и отсутствии диффузионных переходов ключевой компонент из состояния

$$S^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

с течением времени переходит в состояние

$$S^{100} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.23)$$

Как видно из рисунка 2.15 накопление ключевого компонента происходит в самой крайней правой нижней ячейке цепи.

С течением времени при наличии ненулевой вероятности диффузионных переходов и при сегрегирующем ключевом компоненте происходит его переход из начального состояния

$$S^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

в состояние

$$S^{185} = \begin{pmatrix} 0.054 & 0.0105 & 0.0205 & 0.0405 \\ 0.0161 & 0.0315 & 0.0615 & 0.1216 \\ 0.0483 & 0.0945 & 0.1846 & 0.3649 \end{pmatrix}, \quad (2.25)$$

которое является промежуточным состоянием с точки зрения качества смеси по сравнению с двумя предыдущими рассмотренными случаями (рисунок 2.16).

На рисунке 2.17 приведена оценка качества смеси в установившемся режиме на выходе из смесителя в зависимости от величины безразмерного коэффициента диффузии d .

На рисунке 2.18 показано влияние величины вероятности сегрегации v_y на качество смеси при установившемся режиме.

С ростом d среднеквадратичное отклонение от равномерного распределения содержания ключевого компонента в ячейках последнего столбца уменьшается, что говорит об улучшении однородности смеси. Наоборот, с увеличением вероятности сегрегации происходит снижение качества смеси с точки зрения ее однородности, среднеквадратичное отклонение растет.

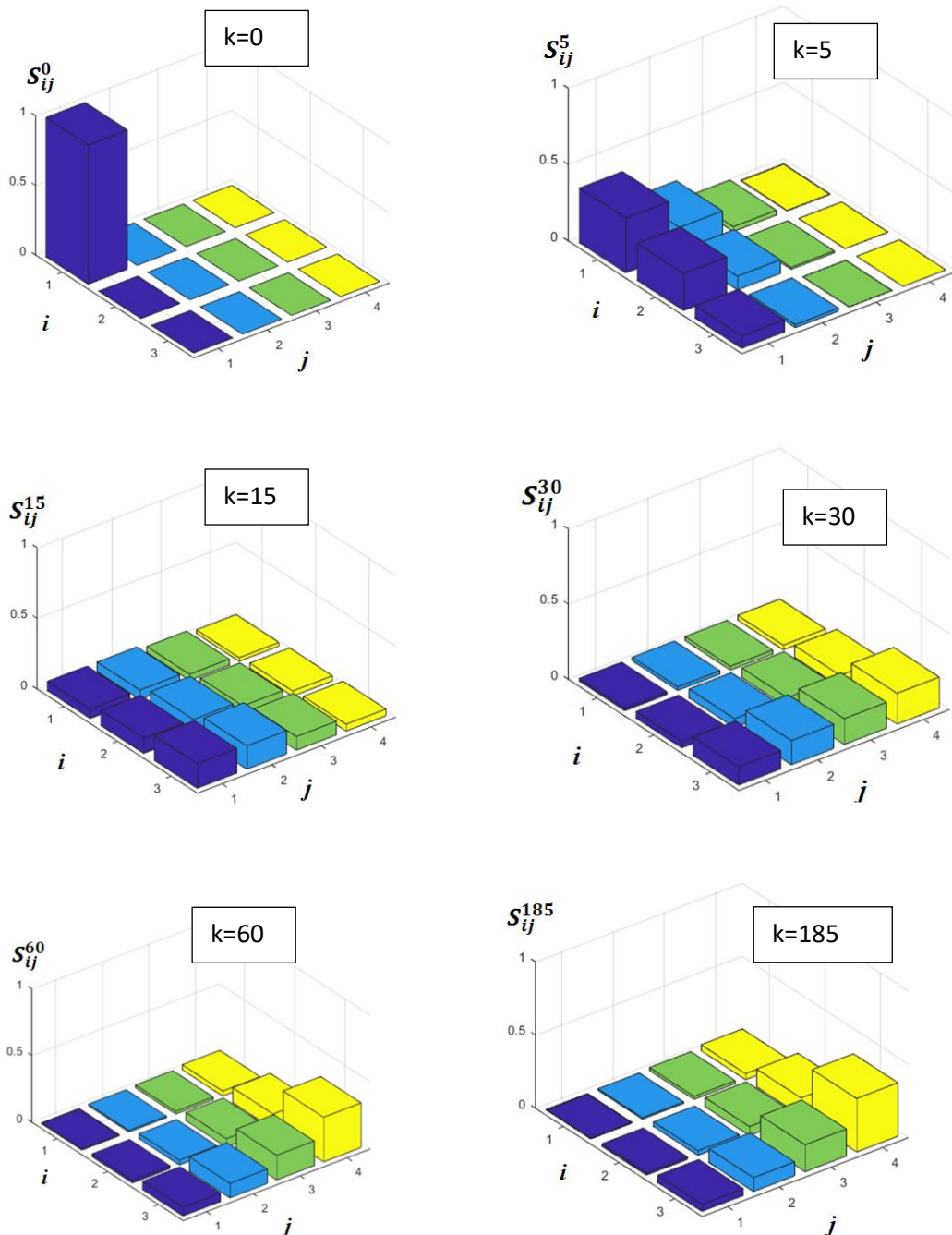


Рисунок 2.16. : число слоев $m=3$, число столбцов $n=4$, диффузия $d=0.05$, скорость сегрегации $v_y=0.1$ и скорость потока $v_x=0.1$

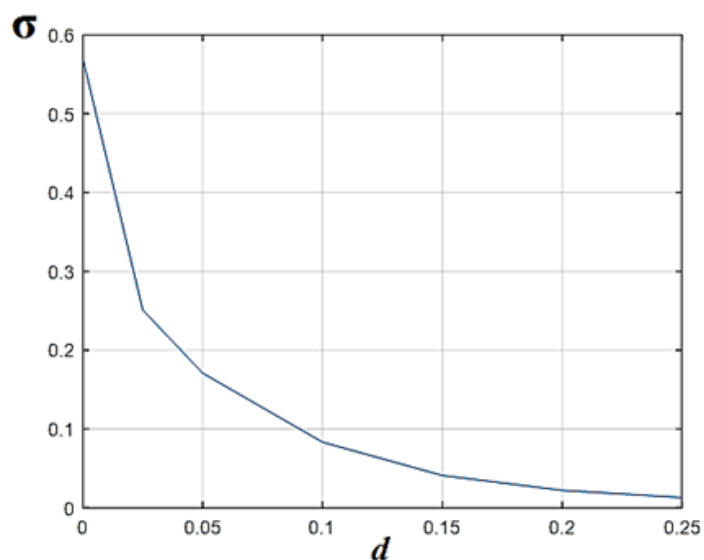


Рисунок 2.17. Влияние величины безразмерного коэффициента диффузии на качество смеси при установившемся режиме

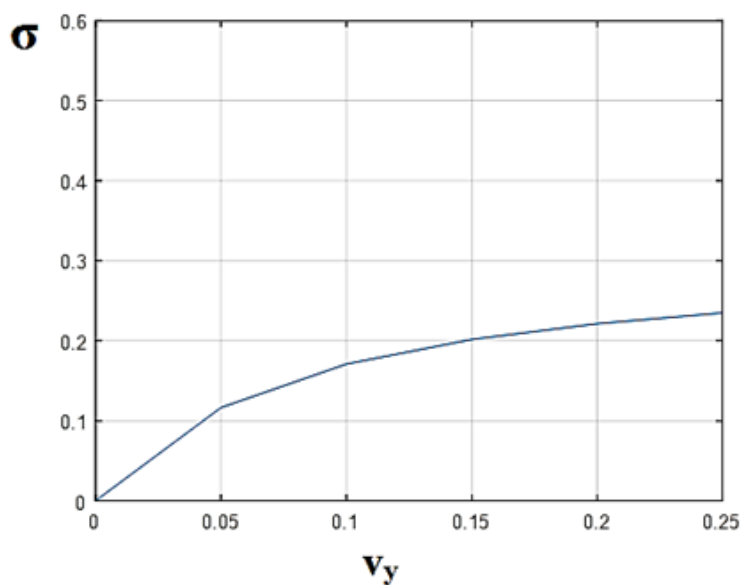


Рисунок 2.18. Влияние величины безразмерной скорости сегрегации на качество смеси при установившемся режиме

При расчетах с моделью двухмерного процесса перемешивания ключевой компонент непрерывно подавался в левую верхнюю ячейку с произво-

дительностью единица массы на переход. Это обусловлено тем, что при подаче компонентов в смеситель начинается переходный процесс заполнения объема сыпучей средой. В дальнейшем процесс приходит в установившееся состояние. Ячейки пространства заполнены частицами смеси. Поэтому подача частиц компонентов может осуществляться только в верхнюю левую ячейку объема смесителя.

На рисунке 2.19 приведен алгоритм расчета процесса непрерывного смешивания сыпучих сред. Для определения показателей работы вибрационного смесителя непрерывного принципа действия необходимо провести экспериментальные исследования физико-механических характеристик компонентов процесса смешивания. К ним относятся: фракционный состав сыпучих компонентов как ключевого, так и остальных составляющих и пропорции их содержания в производимой смеси. К исходным данным относятся диапазон параметров колебаний смесителя, который, в первом приближении, может быть определен из расчетно-экспериментальных исследований процесса периодического смешивания той же сыпучей среды. Зная производительность смесителя, можно определить скорость транспортирования сыпучего материала по рабочей камере аппарата. Скорость определяется из полученной экспериментально зависимости разгрузочной характеристики смесителя от его производительности. Зная габариты камеры смешения можно рассчитать высоту виброоживленного слоя.

Высота слоя, параметры вибрации воспроизводятся в лабораторных тестовых опытах по периодическому фракционированию исследуемой сыпучей среды. Определяется зависимость извлечения частиц ключевого компонента их исходного материала. Результаты данных исследований будут приведены в главе 3. С помощью ячеечной модели периодического фракционирования сыпучей среды определяются стохастические параметры процесса фракционирования, которые вместе со скоростью транспортирования сыпучего материала по смесителю и высотой виброоживленного слоя вводятся в модель процесса непрерывного смешивания [139 – 147]. Модель

позволяет рассчитать время пребывания материала в смесителе и степень неоднородности готовой смеси, выходящей из аппарата.

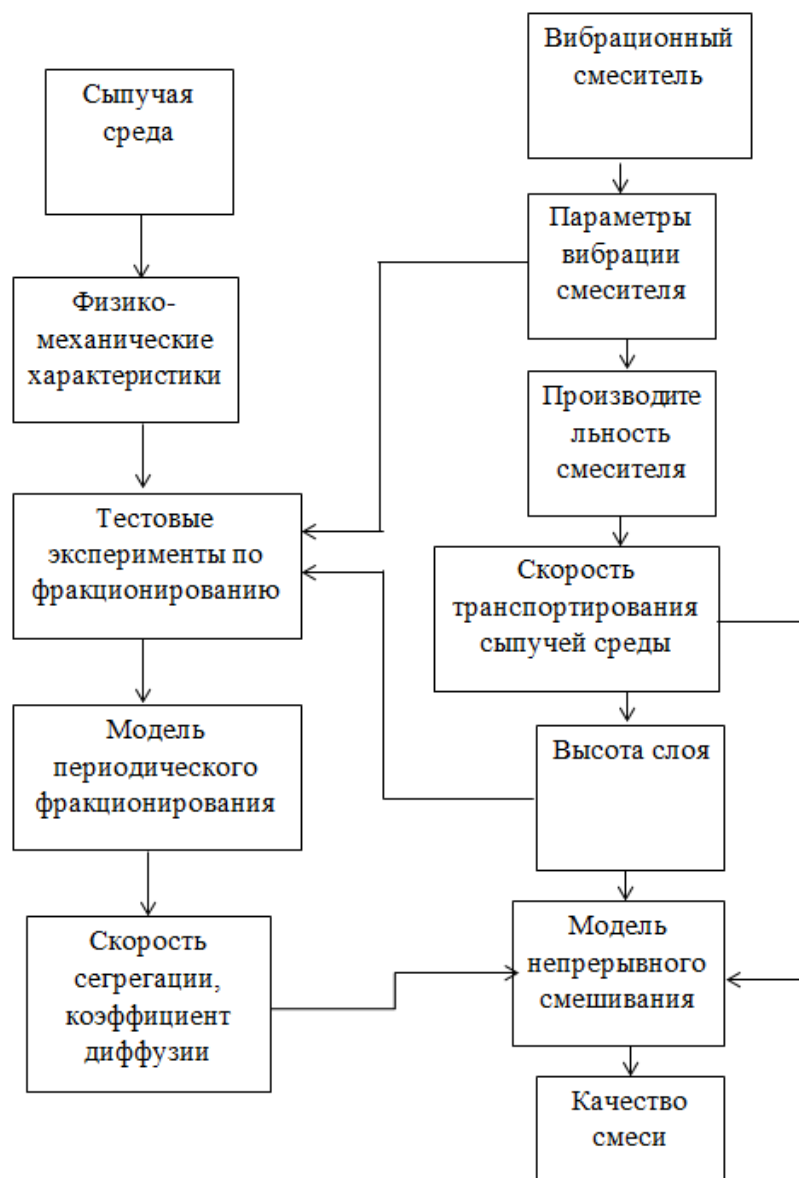


Рисунок 2.19. Алгоритм расчета процесса непрерывного смешивания сыпучих сред

Данная процедура повторяется в других вариантах исследований при других амплитудах и частотах колебаний смесителя.

Выбирается вариант, в котором степень неоднородности готовой смеси имеет минимальное значение. Так как время смешивания, обеспечивающее минимальную степень неоднородности смеси, определяется расчетным путем, то реальное время процесса промышленного смешивания может быть скорректировано за счет создания небольшого угла наклона смесителя (уменьшения времени транспортирования) или включения при небольшом угле наклона реверсивного вращения дебалансного вибровозбудителя (увеличение времени транспортирования).

2.3. Выводы по главе 2.

По настоящей главе можно сделать следующие выводы:

1. Использование математического аппарата теории цепей Маркова для описания закономерностей процессов периодического и непрерывного процессов перемешивания позволяет создать простой алгоритм определения показателей процесса. С позиций реализации в компьютерной среде MATLAB ячеечная модель легко справляется с ситуацией, когда учитывается большее число факторов (диффузионные и сегрегационные механизмы движения частиц ключевого компонента по виброожиженному сыпучему слою, условия подачи сыпучей смеси в рабочее пространство смесителя и другие), определяющих процесс перемешивания.
2. Стохастические коэффициенты являются атрибутами ячеечной модели. Они позволяют учитывать физико-механические характеристики сыпучей среды, параметры вибрации смесителя. Для частиц каждого конкретного ключевого компонента сыпучей среды и конкретного режима колебаний миксера стохастические коэффициенты будут иметь определенное значение.
3. Расчет одного режима как периодического, так и непрерывного типа перемешивания занимает не более одной минуты машинного времени.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В АППАРАТАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Перемешивание конкретной сыпучей среды, состоящей из двух или более компонентов, имеет свои особенности и должно проводиться при режиме вибрации, который обеспечивает максимальные показатели работы смесителя. Поэтому вероятно существование определенного колебательного режима, создающего благоприятные условия для перемешивания частиц конкретной смеси, друг относительно друга.

Существуют сложные технологические задачи при промышленном перемешивании сыпучих смесей, которые до сих пор еще не нашли решения. Это, во-первых, определение времени процесса перемешивания при периодическом режиме, во-вторых, степени заполнения объема смесителя сыпучими материалами. При непрерывном процессе сложно определить оптимальную скорость движения сыпучего материала по рабочей камере смесителя. Ответы на эти вопросы технологи пытаются найти эмпирическим путем.

Поэтому задачей данной главы — это определение параметров колебаний вибрационного смесителя, обеспечивающих высокое качество продуктов процесса перемешивания.

3.1. Техника эксперимента периодического смешивания и методика обработки полученных результатов

3.1.1. Описание экспериментальной установки. Цели экспериментальных исследований

Физическая природа миграции частиц по виброожигенному слою процессов фракционирования и перемешивания одинакова. В том и другом случае слой сыпучего материала подвергается вибровоздействию и прихо-

дит в виброоживленное состояние. Если взять одну и ту же сыпучую смесь, разместить ее на вибрирующем сите или вибрирующей поверхности, которые совершают колебания с одинаковыми амплитудами и частотами, слоем одной и той же высоты, то процессы миграции частиц по слою будут очень похожи, особенно на начальном этапе.

Моделирование этих процессов тоже имеет много общего, что видно из работ Е.А. Непомнящего, О.Н. Тихонова, В.Е. Мизонова [5, 6, 21, 29 – 37]. В качестве модельного уравнения этих процессов используется уравнение конвективной диффузии. В работах Огурцова В.А., Баранцевой Е.А. и их учеников уравнение конвективной диффузии, описывающее процессы перемешивания и фракционирования сыпучих материалов, решаются с помощью математического аппарата теории цепей Маркова [8, 23, 57, 58].

Учитывая вышесказанное экспериментальная часть работы выполнена на универсальной вибрационной установке, на которой можно проводить эксперименты как по фракционированию частиц различной крупности, так и по их перемешиванию. Фотография данной установки представлена на рисунке 3.1.

Естественно, что данную установку можно условно назвать смесителем или классификатором. Перенос результатов эксперимента на реальные процессы промышленных аппаратов невозможен. Но простота лабораторной установки и наглядность процессов, происходящих в ее рабочей камере, позволяют отслеживать закономерности движения частиц друг относительно друга.

Результаты экспериментов и их математическое описание могут являться доказательной базой адекватности предлагаемых математически моделей периодического и непрерывного процессов смешивания сыпучих материалов.

Опыты на данной установке позволяют отработать методику тестовых экспериментов с реальными сыпучими смесями, которые послужат базой для расчетов процессов, происходящих в промышленных аппаратах.



Рисунок 3.1. Фотография универсальной лабораторной установки

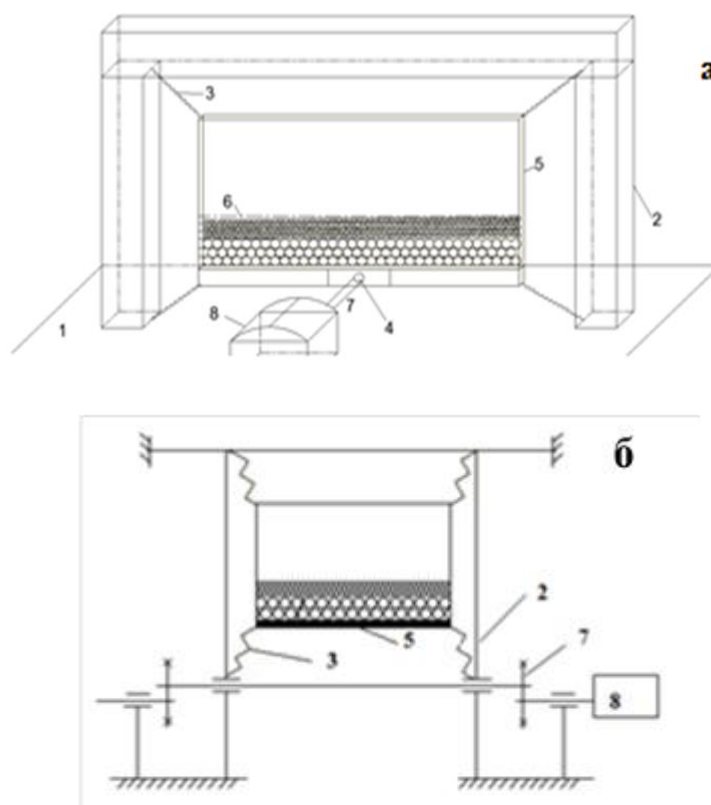


Рисунок 3.2. Общий вид экспериментальной установки для исследования процесса смешивания (а) и ее кинематическая схема (б)

Лабораторная установка представляет собой два плоских экрана (5), выполненных из органического стекла (плексигласа), на которых для удобства нанесены разграничительные линии слоёв (6). В нижней части экраны соединены металлическими пластинами с отверстием (4), через которое проходит составной эксцентриковый вал с винтами, позволяющими регулировать амплитуду колебаний (7), соединенный с электродвигателем (8). Число оборотов двигателя позволяет изменять частоту вибровоздействий, которая определяется при помощи прибора «Вибротест – МГ4». Для обеспечения устойчивости установки во время проведения экспериментов экран закреплен в углах пружинами (3). Пружины соединяются с рамой установки (2), жестко соединенной со станиной (1), чем обеспечивается основная жесткость всей конструкции.

Между плоскими экранами помещались в одной серии опытов деревянные и в другой серии металлические шайбы размерами 4 и 11 мм, которые могли перемещаться в пространстве между пластинами друг относительно друга. Экран являлся разъемным, что давало возможность создать любое начальное распределение мелких частиц среди крупных.

Интенсивность вибрационных воздействий на сыпучую среду описывали при помощи величины безразмерного ускорения (критерий подобия или число Фруда)

$$Fr = \frac{\omega^2 \cdot A}{g}, \quad (3.1)$$

где ω и A – частота и амплитуда приложенных вибровоздействий соответственно, g - ускорение свободного падения.

При описании закономерностей относительного движения частиц в рабочей камере агрегата используется переносная сила инерции, которая определяется через амплитуду и частоту колебаний вибрирующей плоскости, передающей вибровоздействие сыпучей среде. Число Фруда характеризует соотношение между силой инерции и внешней силой тяжести, в поле которой происходит движение частицы.

В экспериментах, проводимых на данной установке, величина Ft варьировалась в пределах от 1 до 3, при этом амплитуда колебаний изменялась от 2 мм до 4 мм, частота колебаний – от 12 Гц до 14 Гц.

Цели экспериментальных исследований на данной установке:

- 1) создание расчетно-экспериментального метода определения стохастических параметров, вводимых в модель смешивания;
- 2) доказательство адекватности предлагаемой ячеечной модели реальному процессу;
- 3) проверка предлагаемой гипотезы по определению вибрационного режима колебаний смесителя, обеспечивающего максимальное качество процесса.

3.1.2. Методика определения стохастических параметров ячеечной модели перемешивания сыпучих смесей по распределению частиц ключевого компонента по высоте виброоживленного слоя

Достоинством установок плоской формы является возможность наблюдать за процессами движения частиц по слою и их распределением. Для определения распределения содержания ключевого компонента по высоте миксера использовали средства цифровой обработки изображений.

Фотофиксация процесса перемешивания осуществлялась с интервалом времени 5 секунд, полное время процесса составляло 80 с. С целью подтверждения достоверности получаемых результатов все эксперименты были воспроизведены при одинаковых условиях по 5 раз.

Определение распределения содержания ключевого компонента по высоте смесителя осуществляли при помощи средств цифровой обработки изображений. При помощи цифровой камеры (Canon EOS 1200d), соединенной с компьютером, выполняли фотофиксацию процесса смешения через равные промежутки времени (рисунок 3.3).

В качестве инструмента, позволяющего достаточно легко проводить анализ изображений, был выбран один из программных пакетов, представляющий широкий спектр средств для математических расчетов и моделирования в различных областях науки и техники – пакет MATLAB [132].

В MATLAB имеется возможность с помощью собственного языка программирования создавать окна, напоминающие обычные приложения (среда разработки Graphic User Interface development environment). Кроме того, MATLAB включает в себя одно из программных средств обработки изображений – пакет Image Processing Toolbox. Этот пакет предоставляет полный набор современных стандартных алгоритмов и графических инструментов для анализа и визуализации изображений, имеет средства для разработки новых алгоритмов.

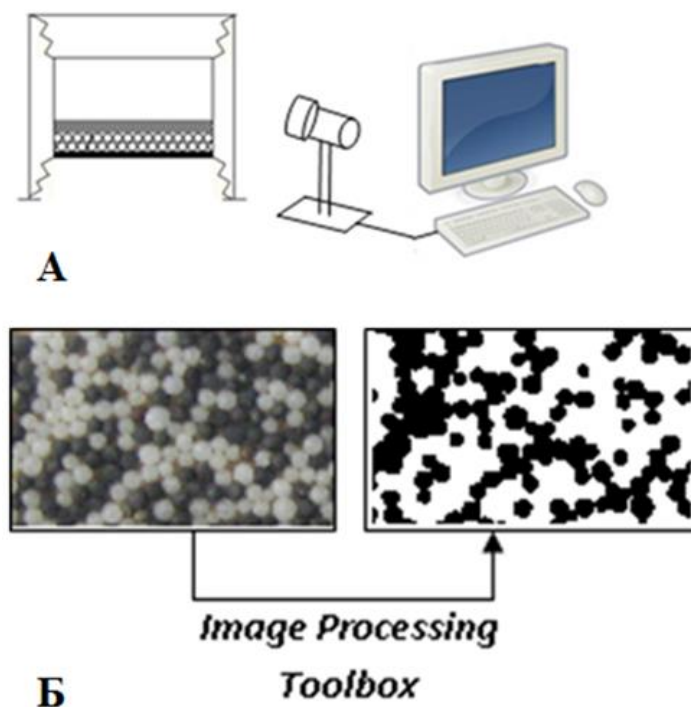


Рисунок 3.3. Схема процесса получения (А) и обработки (Б) цифровых изображений

Приложения MATLAB являются графическими окнами, содержащими элементы управления (кнопки, списки, переключатели, флаги, полосы скроллинга, области ввода, меню), а также оси и текстовые области для вывода результатов работы [132 – 135].

Создание приложений включает следующие основные этапы - расположение нужных элементов интерфейса в пределах графического окна и определение действий (команд MATLAB), которые выполняются при обращении пользователя к данным объектам, например при нажатии кнопки. Процесс работы над приложением допускает постепенное добавление элементов в графическое окно, запуск и тестирование приложения, и возврат в режим редактирования. Конечным результатом является программа с графическим интерфейсом пользователя (GUI), содержащаяся в нескольких файлах, запуск которой производится указанием ее имени в командной строке MATLAB или в другом приложении [132].

Рассмотрим основные этапы создания приложения для обработки цифровых изображений, полученных экспериментально. Запуск приложения с графическим интерфейсом `Application_count` осуществляется из командной строки MATLAB (рисунок 3.4).

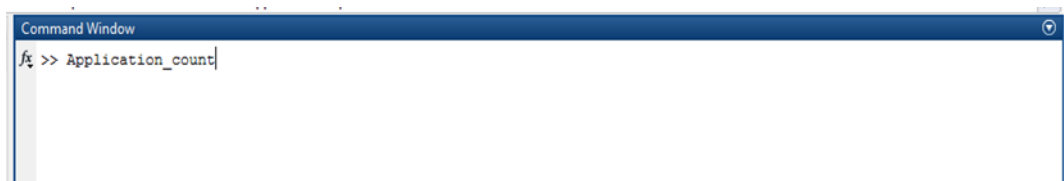


Рисунок 3.4. Запуск приложения

Выбор анализируемого изображения осуществляется из диалогового меню File (рисунок 3.5).

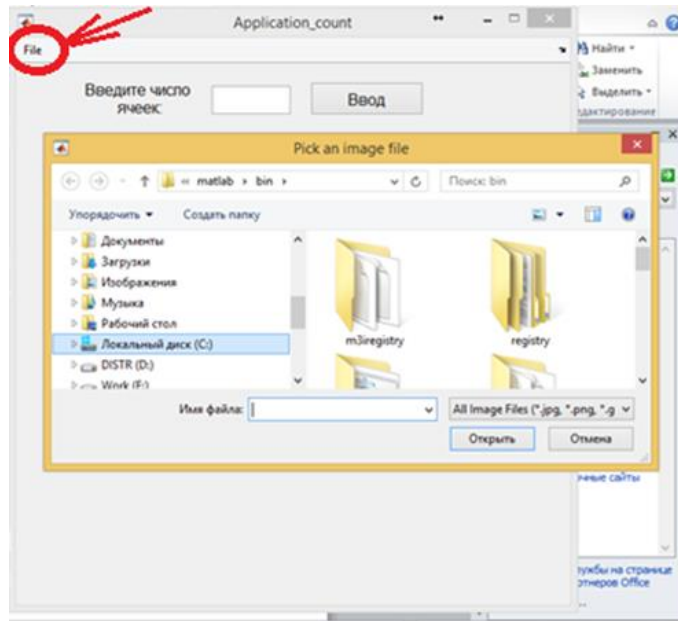


Рисунок 3.5. Выбор исходного изображения из меню File

Графическое окно содержит текстовое поле для ввода числа ячеек, на которые разбивается рабочий объем миксера, и кнопку «Ввод». При вводе числового значения и нажатии кнопки происходит событие Callback данного элемента управления.

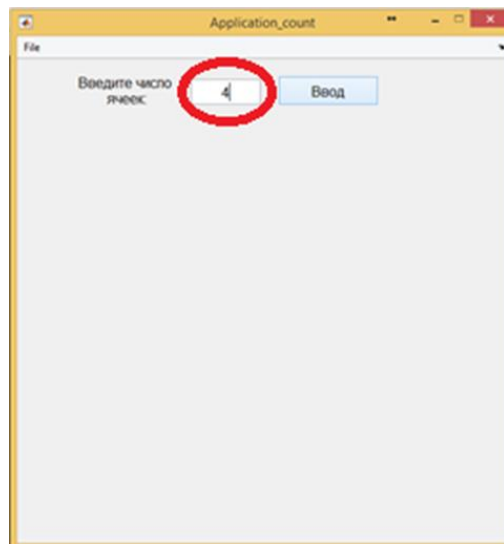


Рисунок 3.6. Текстовое поле для указания числа ячеек

Вызывается подфункция, отвечающая за выполнение операции, а именно – начинается процесс обработки выбранного изображения при помощи стандартных функций пакета Image Processing Toolbox. По окончании процесса, изображения выводятся на соответствующий элемент управления – axes (см. рисунок 3.7).

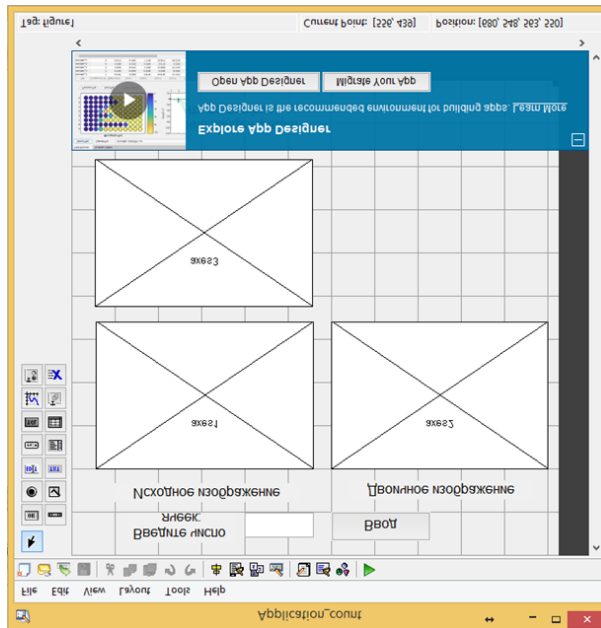


Рисунок 3.7. Элементы управления разработанного GUI - приложения

Алгоритм обработки изображения включает следующие этапы. Изображение считывается (функция `imread`) и используется для загрузки изображений в рабочее пространство MATLAB. Затем подвергается пороговой обработке (функция `threshold`), устранению шума с использованием морфологических функций (`imopen`, `imclose` - морфологическое открытие и закрытие), фильтрации для устранения цветовых искажений фона и неравномерной засветки. Следующим шагом является перевод изображения из полноцветного в бинарное (функция `im2bw`) или двоичное.

Большинство изображений в MATLAB запоминаются как двумерные массивы (матрицы), в которых каждый элемент матрицы соответствует одному пикселю изображения, отображаемому одной точкой на экране дисплея. Так, черно-белое изображение, состоящее из 100 строк и 200 столбцов, будет храниться в MATLAB как матрица 100x200 элементов. Если изображение цветное, оно будет храниться в трехмерном массиве, где первая плоскость в третьем измерении представляет красную составляющую яркости пикселей, вторая плоскость представляет зеленую составляющую яркости пикселей, а третья представляет синюю составляющую яркости пикселей. Существуют следующие типы изображений: бинарные (черно-белые), полутоновые (в виде оттенков серого, grayscale), палитровые (индексиро-

ванные) и полноцветные. Бинарные изображения представляют собой массив, элементы которого могут принимать лишь два значения – 0 и 1, что очень удобно с точки зрения их обработки. В работе принято, что точкам ключевого компонента соответствовали 1, точкам другого компонента – 0.

На рисунке 3.8 приведена иллюстрация фрагмента бинарного изображения и его увеличения в месте установки курсора.

Исходное изображение по вертикали разбивалось на более мелкие части в соответствии с указанным в текстовом поле числом ячеек. Далее осуществляли расчет концентрации ключевого компонента путем подсчета черных пикселей каждого бинарного изображения (значение 0), зная размер в пикселах всего изображения.

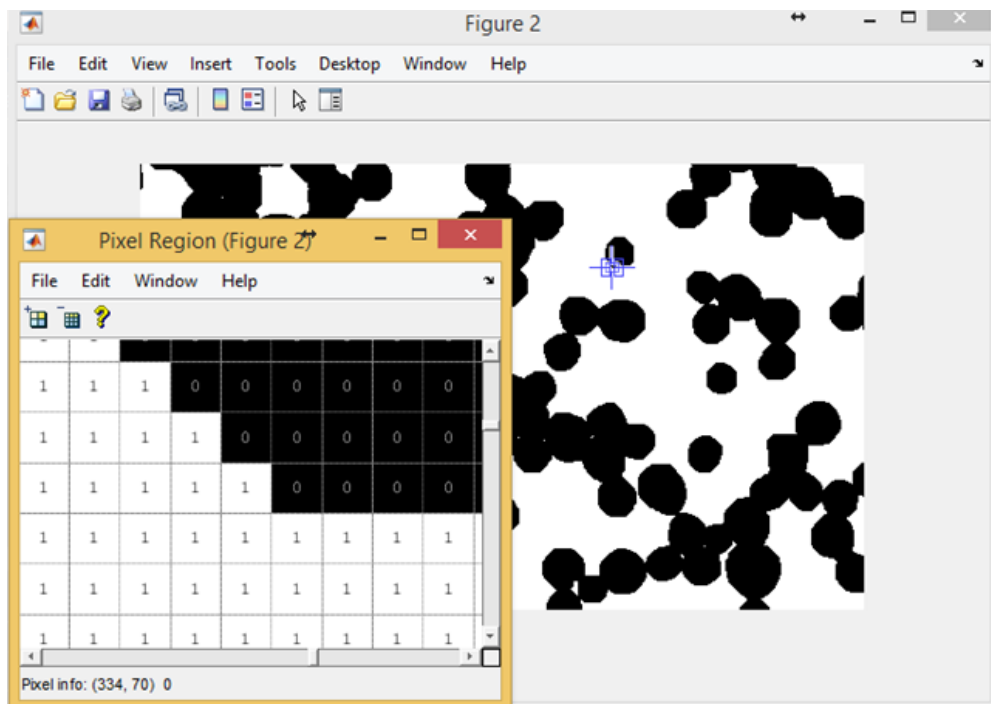


Рисунок 3.8. Бинарное представление исходного изображения

Полученное распределение концентрации ключевого компонента смеси по высоте смесительного аппарата, исходное изображение состояния смеси и его бинарное изображение выводилось на соответствующие оси разработанного графического приложения. Пример работы приложения

приведен на рисунке 3.9. Разработанное средствами MATLAB приложение позволило получать распределение содержания ключевого компонента смеси по высоте смесителя в любой фиксированный фотокамерой момент времени.

Параметры идентификации разработанной модели – вероятность конвективного переноса, т.е. скорость сегрегации ключевого компонента v и безразмерный коэффициент диффузии d — определялись по локальным характеристикам процесс смешивания, т.е. по распределению частиц ключевого компонента по высоте виброоживленного слоя сыпучей среды.

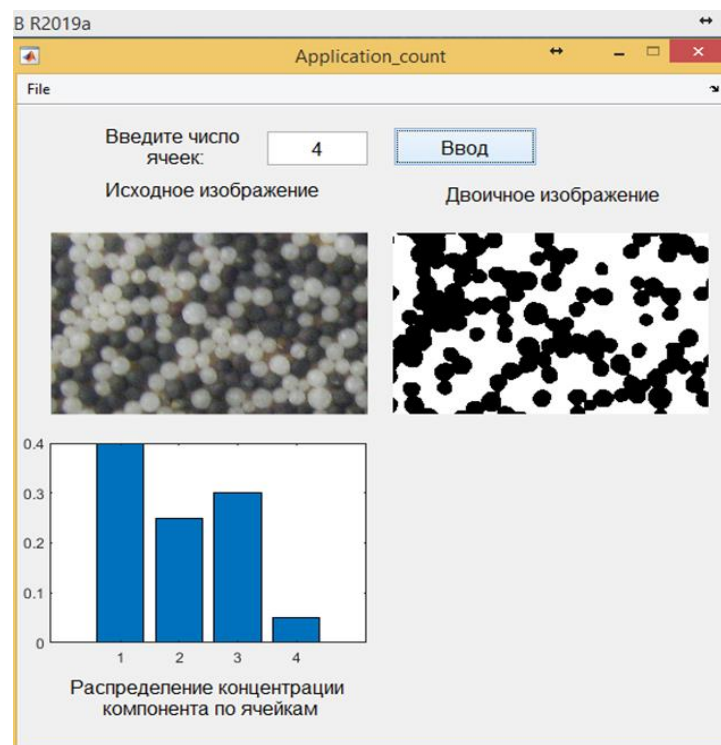


Рисунок 3.9. Иллюстрация работы созданного GUI- приложения

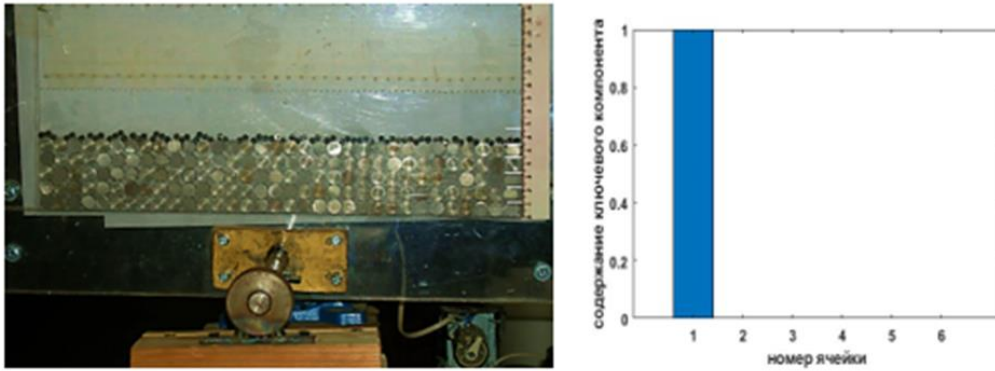
3.1.3. Исследование движения частиц по виброоживленному слою при их перемешивании

На рисунке 3.10 приведены результаты фотосъемки одного из вариантов серии опытов процесса смешивания в определенные моменты времени и соответствующие распределения ключевого компонента, полученные путем обработки изображений (экспериментальные) и рассчитанные по модели.

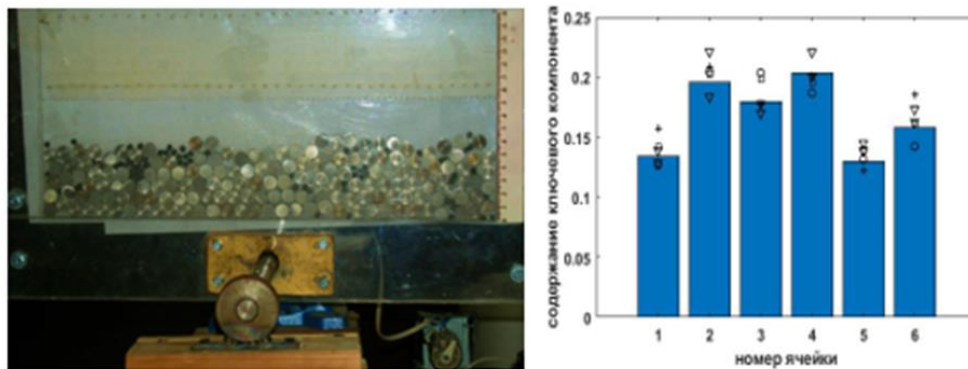
Процесс моделировался рекуррентным матричным равенством (2.1),

приведенном в главе 2 и матрицей переходных вероятностей (2.2).

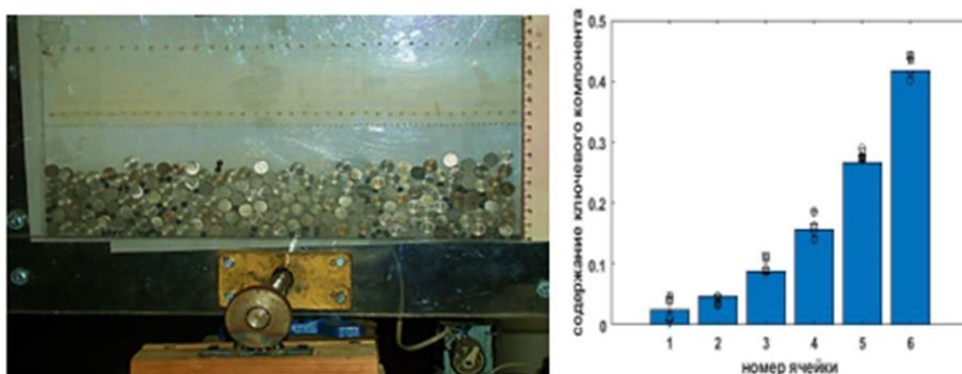
Высота одной ячейки слоя сыпучего материала $\Delta y = 11$ мм. Число ячеек – 6.



а) Начальное состояние смеси, установка неподвижна $t=0$ с



б) Момент времени $t=10$ с



в) Момент времени $t=25$ с

Рисунок 3.10. Фотофиксация процесса в различные моменты времени и соответствующее фотографиям распределения ключевого компонента по ячейкам цепи: эксперимент – точки, расчет – диаграмма

Интенсивность вибрационных воздействий определяется критерием Фруда, характеризующем отношение переносной силы инерции и силы тяжести частицы, движущейся в виброоживленном слое сыпучего материала. Данная серия опытов проводилась при $Fr = 3$.

Стохастические коэффициенты процесса определялись идентификацией расчетных и опытных значений концентраций мелких частиц в соответствующих ячейках слоя по методу наименьших квадратов с использованием стандартной программы для ЭВМ в среде MATLAB. Безразмерная скорость сегрегации и безразмерный коэффициент диффузии вычислялись из условия минимума суммы квадратов отклонений экспериментальных и расчетных значений относительной концентрации мелких частиц, находящихся в ячейках слоя в различные моменты времени.

Сравнение результатов расчетов распределения частиц ключевого компонента по ячейкам слоя и осреднённых опытных данных дали следующие результаты. Скорость сегрегации составила $V = 3,3$ мм/с, коэффициент диффузии – $D=36,3$ мм²/с.

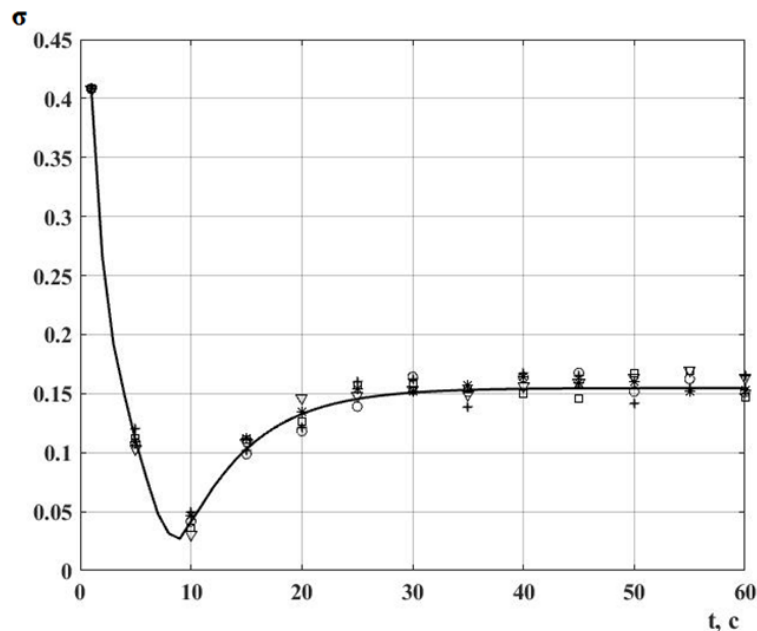


Рисунок 3.11. Состояние качества смеси с течением времени (линия – расчет, точки – эксперимент)

Расчетно-экспериментальные исследования показали, что максимально качественная смесь с точки зрения ее однородности достигается при времени перемешивания $t = 9$ секунд. Это минимум среднеквадратичного отклонения качества смеси от идеального. Из рисунка 3.11 следует что, после этого времени, продолжая процесс перемешивания, получаем ухудшение качества смеси. Происходит рост среднеквадратичного отклонения до определенного значения, после чего процесс стабилизируется.

Как показали результаты экспериментов на данной установке с данным материалом с ростом величины критерия Fr происходит интенсификация процесса смешивания (рисунок 3.12).

Количественная оценка адекватности модели проводилась при помощи определения среднего отклонения между модельными и экспериментальными значениями степени неоднородности частиц ключевого компонента в ячейках слоя сыпучего материала и рассчитывалась по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{|\sigma_{\text{мод}} - \sigma_{\text{эксп}}|}{\sigma_{\text{эксп}}} 100\%, \quad (3.2)$$

где N – число экспериментов, $\sigma_{\text{эксп}}$ – мера качества смеси из эксперимента, $\sigma_{\text{мод}}$ – мера качества смеси из модели. Отклонение составляло не более 3,5 %, что доказывает адекватность предлагаемой ячеечной модели исследуемому процессу смешивания сыпучих материалов.

Значение среднеквадратичного отклонения σ быстрее достигает минимума (максимальной однородности смеси), что говорит об увеличении интенсивности перемешивания на начальных стадиях процесса. В конечном итоге, лучшее качество смеси достигается при $F=1.5$, но для этого требуется большее время.

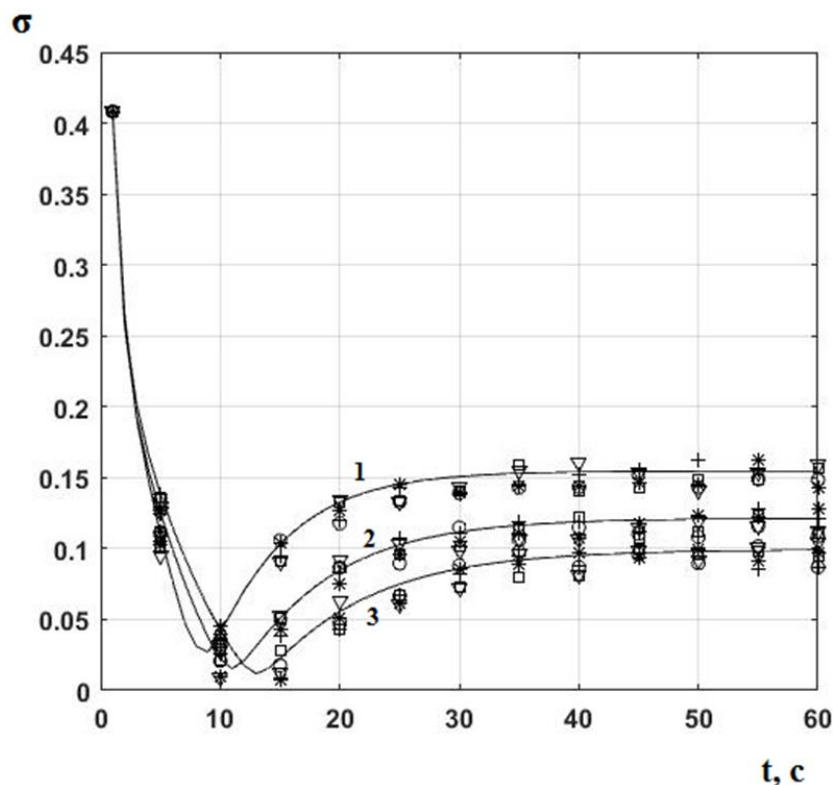


Рисунок 3.12. Зависимость качества смеси от Fr с течением времени:

1 — $Fr=3$; 2 — $Fr=2.3$; 3 — $Fr=1.5$

3.1.4. Методика определения стохастических параметров ячеечной модели перемешивания сыпучих смесей по результатам тестовых экспериментов фракционирования той же смеси

Для определения стохастических параметров ячеечной модели перемешивания смесей (коэффициентов макроdiffузии и скоростей сегрегации) используем методику тестовых экспериментов по фракционированию сыпучих материалов, разработанную Огурцовым В.А. и его учениками [35, 44, 139 – 147].

В работе [60] доказано, что стохастические коэффициенты: коэффициент диффузии и начальная скорость сегрегации, определяемых из тестовых опытов процессов фракционирования и перемешивания, совпадают, если опыты проводятся при одинаковых условиях. То есть, состав сыпучей среды, количество и качественный состав, начальная высота слоя материала и

начальное распределение частиц исходной сыпучей смеси для сравниваемых опытов не менялись, параметры колебаний (амплитуда и частота) рабочего органа на сыпучий слой были одинаковы.

Методика определения стохастических коэффициентов ячеечной модели, которая применяется к процессу перемешивания, из тестовых экспериментов по периодическому фракционирования сыпучих смесей состоит из следующих этапов.

Первый этап – это математическое моделирование процесса периодического фракционирования.

Рассматривается движение мелких частиц некоторой фракции, которую так же будем называть ключевым компонентом смеси, по виброоживленному слою. Слой сыпучего материала разбивается на $n-1$ ячеек толщиной Δu (рисунок 3.13, а). К ячейкам цепи слоя добавлена ячейка n , соответствующая подситовому коллектору для сбора мелких частиц. Набор вероятностей нахождения мелких частиц в ячейках образует вектор-столбец состояния ячеек цепи:

$$S = [S_1 S_2 \dots S_m]^T, \quad (3.1)$$

где индекс T означает транспонирование вектора [35].

Через малый промежуток времени Δt осуществляются переходы рассматриваемых частиц из i -ой ячейки в соседние: вверх с вероятностью d (диффузионный перенос); вниз с вероятностью $d+v$, (диффузионный и сегрегационный перенос). Вероятности перехода частиц из предпоследней ячейки цепи следующие: вверх – d , вниз – v_f , соответствующая вероятности выхода частиц в подситовой коллектор.

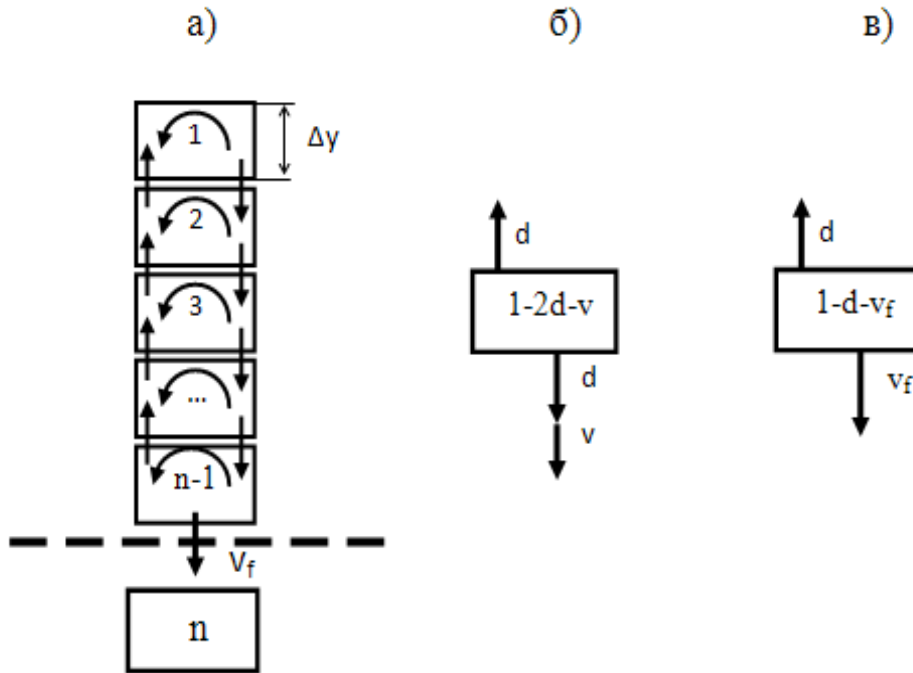


Рисунок 3.13. Схема модели процесса (а), переходные вероятности из i -ой ячейки (б), переходные вероятности из предпоследней ячейки слоя сыпучего материала (в)

Изменение относительной концентрации частиц в ячейках цепи во времени $t_k = (k-1)\Delta\tau$ (k – номер временного перехода, $\Delta\tau$ – время одного перехода) описывается рекуррентным матричным равенством

$$S^{k+1} = PS^k, \quad (3.2)$$

где P – матрица переходных вероятностей, определяемая как

$$P = \begin{bmatrix} 1 - d - v_1^k & d & 0 & \dots & 0 & 0 \\ d + v_1^k & 1 - 2d - v_2^k & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & d + v_2^k & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1 - 2d - v_{m-1}^k & d \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d + v_{m-1}^k & 1 - d \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Особенностью данной матрицы является то, что скорость сегрегации меняется от ячейки к ячейке и от перехода к переходу. Выход мелкой

фракции в подрешетный продукт описан за пределами матрицы \mathbf{P} . На каждом временном переходе после воздействия на вектор состояния \mathbf{S}^k матрицей \mathbf{P} из нижней ячейки цепи выводится доля v_f^k содержащейся в ней частиц ключевой фракции, выход которых составляет

$$q^{k+1} = S_m^{k+1} v_f, \quad (3.4)$$

а оставшаяся в ней доля частиц ключевой фракции

$$S_m^{k+1} := S_m^{k+1} (1 - v_f), \quad (3.5)$$

где $:=$ - оператор присваивания.

Кинетика извлечения частиц ключевого компонента рассчитывается как

$$\varepsilon^{k+1} = \sum_0^{k+1} q^{k+1}. \quad (3.6)$$

Вероятность выхода частиц в подситовое пространство v_f зависит от размеров частиц ключевого компонента, размеров отверстий ячеек сита, светового коэффициента ситового полотна, амплитуды и частоты колебаний сита. Данная вероятность, согласно [35], определяется расчетным путем.

Второй этап методики определения стохастических моделей смешивания и фракционирования сыпучих материалов – это тестовые лабораторные эксперименты по периодическому рассеву смесей.

На рисунке 3.14 представлены результаты одного из серии опытов по рассеву бинарной смеси, состоящей из деревянных шайб размером 4 мм и 11мм. Параметры вибрации экрана: амплитуда $A = 2,8$ мм, частота $\omega = 90$ с⁻¹. Толщина проволоки сита – 1 мм. Размер ячейки сита – 5 мм. Количество ячеек модели – 6, включая подситовое пространство. Количество опытов – 5, проводимых при одинаковых условиях.



а) начальное состояние смеси



б) состояние смеси при $t = 10$ секунд



в) состояние смеси при $t = 20$ секунд

Рисунок 3.14. Результаты рассева бинарной смеси частиц

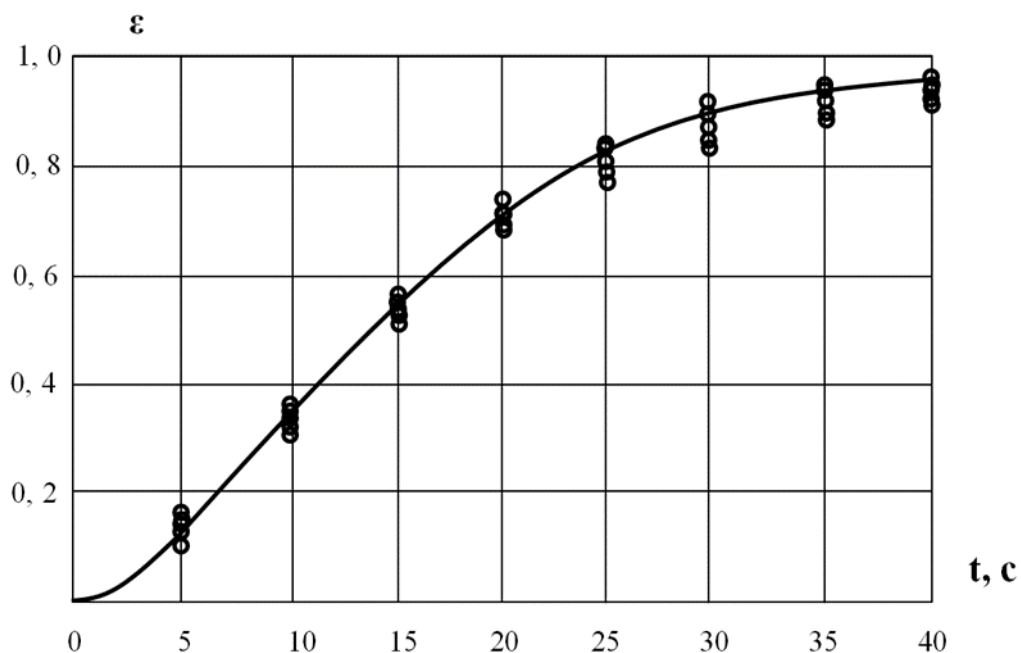
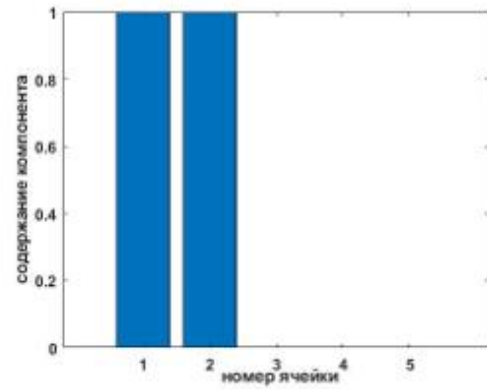
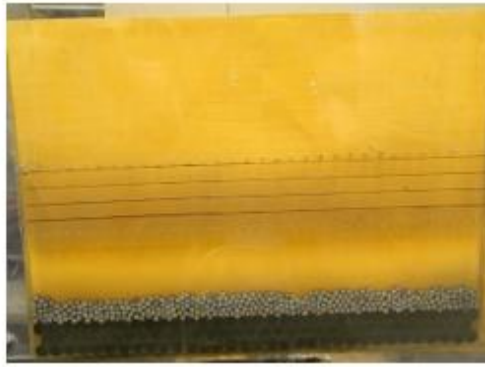


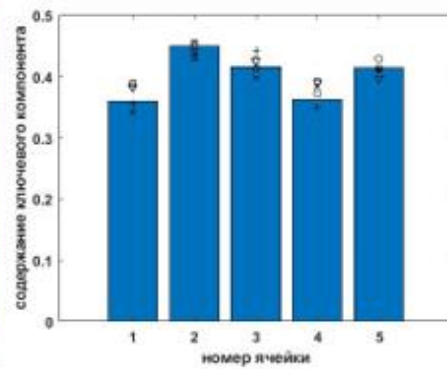
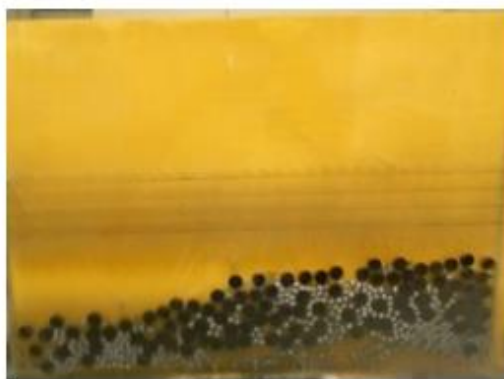
Рисунок 3.15. Кинетика рассева двухкомпонентной смеси

По осредненным опытным данным была получена кинетика извлечения мелких частиц ключевого компонента из бинарной смеси (рисунок 3.15). Идентификация расчетных и опытных данных позволила получить следующие стохастические коэффициенты модели: безразмерная скорость сегрегации $v=0,22$, безразмерный коэффициент диффузии $d= 0,06$. Безразмерная скорость проникновения мелких частиц чарах отверстия сита определялась расчетным путем и составила $v_f = 0,32$.

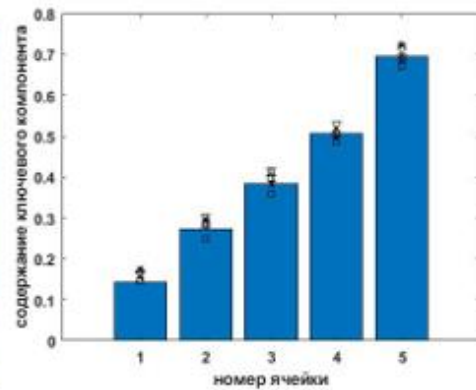
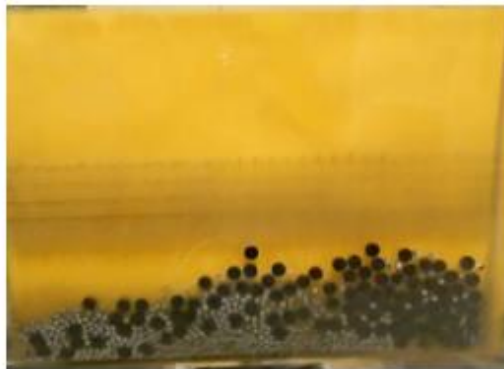
Проводилась другая серия опытов по смешиванию для этой же смеси частиц при тех же параметрах колебаний экрана. Количество крупных и мелких частиц не менялось. Начальное распределение мелких частиц над крупными оставалось прежним.



а) Начальное состояние смеси, установка неподвижна $t=0$ с



б) Момент времени $t=10$ с



в) Момент времени $t=50$ с

Рисунок 3.16. Фотофиксация процесса в различные моменты времени и соответствующее фотографиям распределение ключевого компонента по ячейкам цепи: эксперимент – точки, расчет – диаграмма

На рисунке 3.16 показаны фотографии одного из серии опытов по распределению частиц в виброожигенном слое бинарной смеси в разные моменты времени. Так же приведены расчетные и экспериментальные распределения частиц ключевого компонента по ячейкам цепи.

При получении расчетных диаграмм использовались безразмерные стохастические параметры, полученные из расчетно-экспериментальных исследований опытов по рассеву бинарной смеси.

Оценка адекватности модели процесса смешивания сыпучих сред, использующей результаты тестовых экспериментов по виброфракционирования этой же смеси для определения стохастических коэффициентов, проводилась при помощи определения среднего отклонения между модельными и экспериментальными значениями степени неоднородности частиц ключевого компонента в ячейках слоя сыпучего материала и рассчитывалась по формуле (3.2). Расхождение между расчетными и опытными данными процесса перемешивания данной смеси составило не более 4,5 %. Это доказывает возможность описывать процесс вибрационного перемешивания с помощью ячеечной модели с использованием значений скоростей сегрегации и коэффициентов макродиффузии, полученных из расчетно-экспериментальных исследований лабораторного процесса фракционирования той же смеси при тех же вибрационных режимах.

На рисунке 3.17 показана зависимость качества смеси от времени перемешивания для данной серии опытов.

Минимум среднеквадратичного отклонения содержания частиц ключевого компонента данной бинарной смеси в ячейках цепи от идеального распределения наблюдается при 16 секундах.

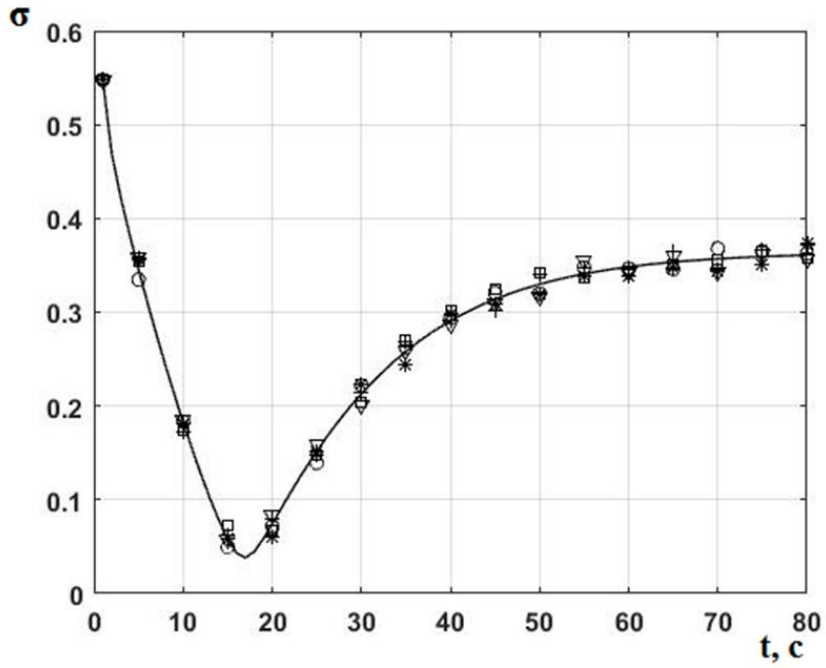


Рисунок 3.17. Состояние качества смеси с течением времени (линия – расчет, точки – эксперимент)

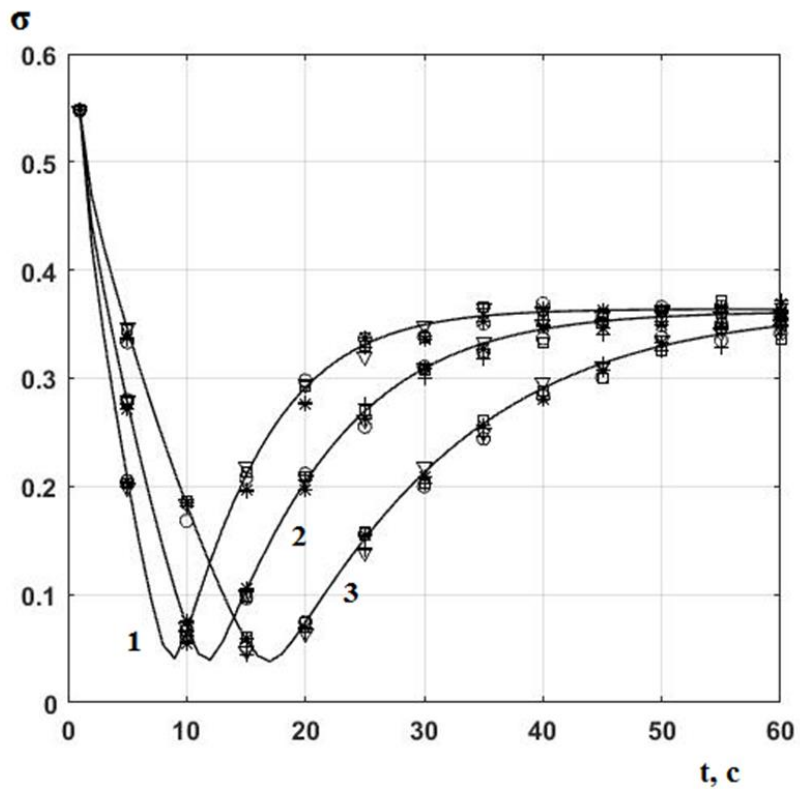


Рисунок 3.18. График зависимости качества смеси от Fr с течением времени:

1 – Fr=3; 2 – Fr=2.3; 3 – Fr=1.5

Как видно из рисунка 3.18 наилучшее качество данной смеси не зависит от параметров колебаний экрана лабораторной установки. Но оно достигается при разном времени перемешивания.

3.2. Расчетно-экспериментальные исследования процесса получения цементно-песчаных смесей на лабораторной установке периодического действия

Расчетно-экспериментальные исследования процессов смешивания и фракционирования бинарной смеси в плоской лабораторной установке показали, во-первых, адекватность ячеечной модели смешивания реальному процессу, во-вторых, возможность использовать результаты тестовых опытов периодического фракционирования смесей для определения стохастических коэффициентов модели смешивания для одних и тех же смесей, если процессы проходят при одних и тех же режимах вибрации.

Таким образом, при расчете процессов смешивания реальных сыпучих материалов так же можно пользоваться результатами лабораторных опытов по их фракционированию.

Универсальная установка для экспериментов по периодическому фракционированию и периодическому смешиванию сыпучих сред представлена на рисунке 3.19.

Установка представляет собой короб, совершающий круговые колебания, которые создает жесткий кинематический вибропривод с помощью эксцентрикового вала, приводимого во вращение электродвигателем. При проведении опытов по фракционированию сыпучей смеси устанавливалось сито со стандартным размером ячеек.

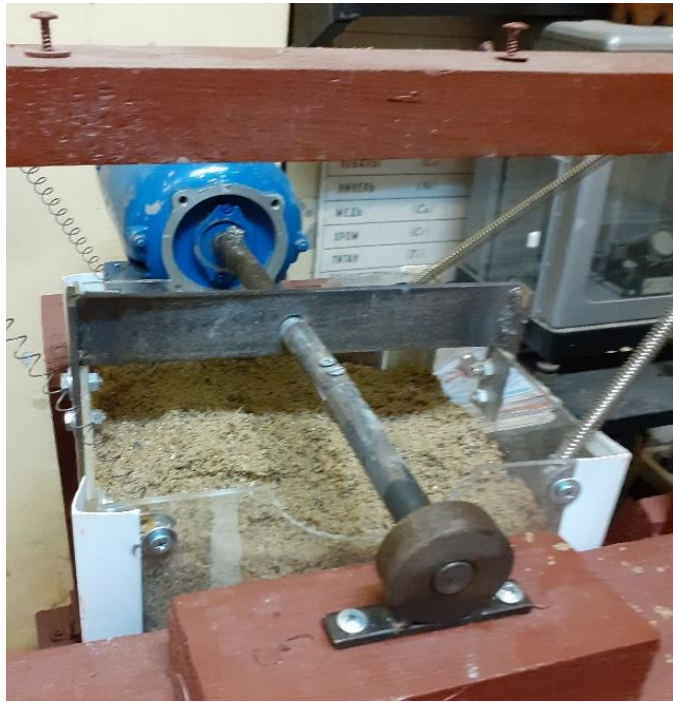


Рисунок 3.19. Вид лабораторной установки для периодического смешивания и фракционирования реальных сыпучих смесей

При проведении опытов по перемешиванию сыпучих материалов устанавливалось дно.

В качестве сыпучего материала, использовалась реальная цементно-песчаная смесь, которая является сухой строительной смесью, часто применяемой строительными предприятиями. Ключевым компонентом смеси являлся цемент марки М500. Другой компонент – песок, соответствующий требованиям ГОСТа 8736-2014, сеяный, мытый, очищенный, изготовитель – ООО «Хромцовский карьер» (Ивановская область). Пропорции компонентов цемент : песок – 1 : 3. Такая смесь марки М200 при добавлении воды используется как монтажно-кладочный раствор, применяемый при возведении стен крупногабаритных объектов и устройстве стяжек с высокой нагрузочной способностью. Размер частиц цемента составлял 0 – 0,5 мм, песка 2 – 4 мм.

Рассмотрим опыты по фракционированию сыпучих смесей. На сито с размером ячейки 1 мм выкладывался песок высотой слоя от 3 до 4,5 см, а на

него цемент, высотой от 1 до 1,5 см. Частота вращения двигателя менялась от 60 до 100 с⁻¹. Контроль за величиной частот проводился с помощью прибора «Вибротест – МГ4». Амплитуда колебаний, равная эксцентриситету вала, выставлялась с помощью регулировочных винтов на ступенчатом валу и соответствовала от 2 до 5 мм.

Включался двигатель, сыпучий материал переходил в виброожиженное состояние. Мелкие частицы цемента начинали проникать через слой песка и отверстия сита. Частицы собирались в коробки – кюветы, которые менялись через каждые 5 секунд. Весь процесс длился не более 80 секунд. Содержимое в кюветах взвешивалось. Использовались весы аналитические ВЛР-200 2М второго класса точности. При одних и тех же условиях опыты проводились 5 раз. По экспериментальным данным строилась кривая кинетики извлечения частиц цемента из смеси. Для фиксированных значений амплитуды и частоты колебаний сита, высоты слоя, начального распределения компонентов смеси по слою сыпучего материала строилась кривая извлечения мелких частиц в подситовое пространство в зависимости от времени отсева.

По предлагаемой математической модели процесса проникновения частиц через отверстия сита [35, 137 -140] определялась вероятность выхода мелких частиц в подситовое пространство

$$v_f = \vartheta p_f \Delta \tau , \quad (3.6)$$

где ϑ – число соударений частицы с ситом в единицу времени; p_f – вероятность прохождения частицы через отверстие сита при одном соударении. Определялось расчетное количество соударений частицы слоя с ситом. Вероятность свободного проникновения проходовой частицы через отверстие сита при одном соударении, находилась по имитационной модели, изложенной в [35]. Рассчитывалась вероятность выхода мелких частиц в подси-

товое пространство

Используя ячеечную модель, проводилась идентификация расчетной и опытной кинетики фракционирования, которая позволила определить параметры модели: безразмерный коэффициент диффузии, безразмерную скорость сегрегации. Результаты расчетно-экспериментальных исследований по определению стохастических коэффициентов из тестовых опытов по фракционированию сыпучих сред представлены в таблицах 3.1 – 3.3.

Таблица 3.1. Значения стохастических коэффициентов из тестовых опытов по фракционированию цементно-песчаной смеси при частоте колебаний сита $\omega = 60 \text{ с}^{-1}$

Амплитуда колебаний сита А, мм	2	3	4	5
Скорость сегрегации $V \cdot 10^2, \text{ м/с}$	0,98	1,45	2,23	3,02
Коэффициент макро-диффузии $D \cdot 10^5, \text{ м}^2/\text{с}$	0,21	0,65	1,31	1,98

Таблица 3.2. Значения стохастических коэффициентов из тестовых опытов по фракционированию цементно-песчаной смеси при частоте колебаний сита $\omega = 80 \text{ с}^{-1}$

Амплитуда колебаний сита А, мм	2	3	4	5
Скорость сегрегации $V \cdot 10^2, \text{ м/с}$	1,46	2,41	4,01	3,02
Коэффициент макро-диффузии $D \cdot 10^5, \text{ м}^2/\text{с}$	0,38	2,35	4,44	5,25

Таблица 3.3. Значения стохастических коэффициентов из тестовых опытов по фракционированию цементно-песчаной смеси при частоте колебаний сита $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$

Амплитуда колебаний сита A , мм	2	3	4	5
Скорость сегрегации $V \cdot 10^2$, м/с	2,03	3,22	5,51	7,21
Коэффициент макро-диффузии $D \cdot 10^5$, м ² /с	0,54	4,12	6,98	9,03

Проводились опыты по смешиванию сыпучих смесей. Круговая частота колебаний короба составляла 60, 80, 100 с^{-1} . Амплитуда колебаний короба 2, 3, 4 и 5 мм. Высота слоя при выключенном виброприводе выбиралась в тех же пределах, что и в опытах по рассеву смесей. Опыты по перемешиванию компонентов проводились при различных вариантах размещения цемента и песка друг относительно друга.

Опыты проводились следующим образом. Производилась загрузка короба. Замерялась высота слоев цемента и песка. На рисунке 3.20 показано положение слоев сыпучих материалов перед перемешиванием.



Рисунок 3.20. Начальное положение сыпучей смеси перед процессом смешивания

Включался двигатель вибропривода. Замерялось время процесса перемешивания. Выключался двигатель. С помощью совка в четырех местах короба отбирались пробы смеси таким образом, чтобы совок захватывал объем от верхней точки слоя до дна короба. Проводился рассев каждой пробы смеси на сите с размером ячейки 1 мм вручную. Проводилось взвешивание цемента и песка. Определялось содержание цемента в каждой пробе и относительное содержание цемента в смеси. При одинаковых условиях опыт проводился пять раз.

На рисунке 3.21 приведена зависимость качества смеси от времени смешивания. На рисунке видно, минимальное время смешивания составляет 70 секунд.

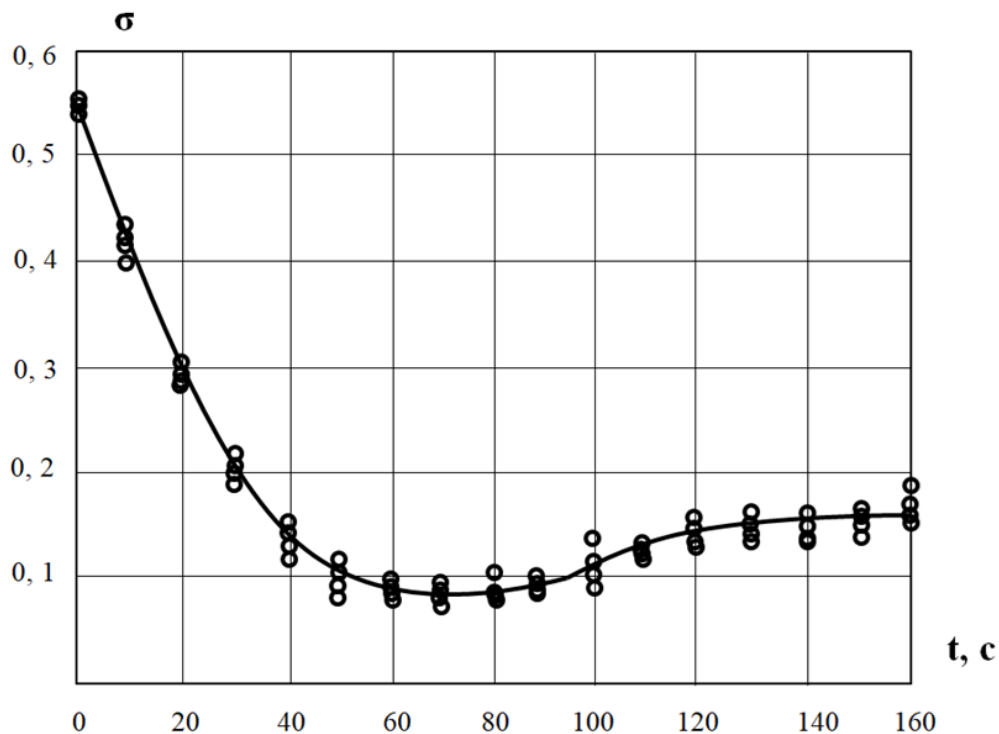


Рисунок 3.21. Зависимость качества цементно-песчаной смеси от времени смешивания

Анализ результатов расчетно-экспериментальных исследований процесса смешивания песка и цемента показал, что в промышленных условиях следует вибровоздействие камеры смешения на сыпучую среду, проводить при величине критерия Фруда $8,0 \leq Fr \leq 10,8$, при амплитуде колебаний $2 \pm 0,2$ мм и частоте колебаний 30 ± 5 Гц,. Данные вибрационные режимы обеспечат степень неоднородности готового продукта процесса смешивания менее 5 %.

3.3. Выводы по главе 3

1. Разработаны установки, позволившие реализовать процесс периодического смешивания и фракционирования.
2. Удовлетворительное совпадение результатов расчётных и опытных данных доказывает достоверность расчета распределения частиц по виброоживленному слою при использовании ячеечной модели процесса смешивания и методики определения стохастических параметров модели из тестовых опытов по периодическому фракционированию.
3. Произведена проверка адекватности модели смешивания и расчета показателей качества процесса с реальными сыпучими смесями.
4. Разработан алгоритм определения стохастических параметров ячеечной модели процесса смешивания для промышленных условий.
5. Определены режимы вибровоздействия смесителя на сыпучую смесь песка и цемента для промышленных условий, при которых степень неоднородности готового продукта процесса смешивания составляет менее 5 %.

ГЛАВА 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ СМЕШИВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Возрастающие в настоящее время требования к качеству продукции предприятий, производящих сухие строительные смеси, определяют необходимость совершенствования технологий, модернизацию оборудования для смешивания сыпучих материалов. Исследование промышленного процесса смешивания сводится к отбору проб сыпучего материала, выходящего из смесителя. Такой эмпирической информации недостаточно для управления процессом смешивания. Использовать эти экспериментальные данные для идентификации математических моделей периодического и непрерывного смешивания промышленному процессу нельзя, так как предлагаемая нами модель требует введения в нее стохастических коэффициентов: скоростей сегрегации и коэффициентов макродиффузии частиц ключевой фракций. Поэтому нами предлагается информацию, необходимую для наших математических моделей, получать из лабораторных опытов периодического рассева.

В настоящий момент около половины всех строительных смесей, выпускаются на предприятиях малого и среднего бизнеса. Многие предприятия стройиндустрии отказываются закупать готовые смеси, а организуют свои технологические линии смешивания сыпучих материалов.

Если в интернете искать тип смесителя для перемешивания конкретных сыпучих материалов, то появится огромная масса предложений. Появится информация о лопастях смесителей, размерах и форме шнеков и масса другой информации с рекомендациями об устройствах, интенсифицирующих процесс перемешивания. Однако, абсолютно нет информации об величинах амплитуд и частот колебаний вибрационных смесителей, которые обеспечат высокое качество процесса перемешивания. Это вызывает недоумение, так как для вибрационных грохотов, где процесс рассева так же происходит в виброоживленном слое, в технологических паспортах агрегатов имеются рекомендации величин амплитуд и частот колебаний сит.

4.1. Результаты внедрения результатов исследования в компании «Daco»

«Daco» (город Родники, Ивановская область) – компания, имеющая собственное производство суперконцентратов, получаемых способом экструдирования, которые применяются для окрашивания при производстве различных изделий из полиэтилена и полипропилена для строительной, химической и других отраслей промышленности. На рисунке 4.1. представлен вид этого цеха.



Рисунок 4.1 Вид цеха собственного производства суперконцентрата

Суперконцентрат – это гранулы черного цвета размером от 2-5 мм. Допускается присутствие гранул до 2 мм и более 5 мм в количестве не более 2%. На рисунке 4.2 представлен вид суперконцентрата.



Рисунок 4.2. Суперконцентрат для окрашивания полимеров

В состав черного красителя входят: сажа (черный краситель), полиэтилен высокого давления (ПВД), линейный полиэтилен, добавки в зависимости от назначения. Суперконцентрат производится как с добавлением мела, так и без него. В таблице 4.1 приведены состав и характеристики различных типов суперконцентратов, производимых компанией «DAsco».

Таблица 4.1. Состав и характеристики различных типов суперконцентратов, производимых компанией «DAsco».

Параметр	ГКТУ- 2040	ГКТУ- 3025	ГКТУ- 4000	ГКТУ- 5000
Содержание активного компонента (НАФ сажа), %	22 ± 4 %	32 ± 4 %	42 ± 4 %	52 ± 4 %
Основа	ПВД, ЛПНП	ПВД, ЛПНП	ПВД, ЛПНП	ПВД
Добавки	Микрокальцит	Микрокальцит	-	-
Насыпная плотность, кг/м ³	600-900	600-900	500-800	500-800

Ключевой компонент смеси – сажа, следующих типов SRF, HAF, RSF, P.

Основной компонент – частицы полиэтилена размером 0,5 – 1,0 мм.

В качестве матирующей добавки используется небольшое количество самой качественной разновидности мела – микрокальцит.

Факторы от которых зависит цена продукции: стоимость сырья, содержание сажи, качество основы (полиэтилена), наличие мела, качество смешения.

В качестве смесительного узла на предприятии «ДАсо» используется одновальный шнековый смеситель периодического действия. Время смешения – 2,5 минуты, максимальная суммарная масса загружаемых компонентов – 50 кг. Производительность смесителя 1500 кг/час. Удельный расход электроэнергии – 4,5 кВт час на тонну продукции.

Нами совместно с представителями отдела качества предприятия были взяты пробы продукта, выходящего из смесителя. По нашей методике определялся коэффициент неоднородности смеси, который составил 7,6 %.

Качество смеси не удовлетворяло руководство фирмы. Поэтому нами были проведены расчетно-экспериментальные исследования, которые позволили рекомендовать установку вибрационного смесителя на линии производства суперконцентратов ГКТУ- 4000 и ГКТУ- 5000.

Были проведены серии тестовых экспериментов по фракционированию смеси частиц полиэтилена и сажи на лабораторной установке со стандартным ситом с размером ячейки 0,063 мм при различных значениях амплитуд и частот колебаний короба. Так как рассев смеси сопровождался забиванием отверстий мелкодисперсными частицами сажи, то перед каждым опытом сита промывались и высушивались. Это позволило получить опытные кривые кинетики фракционирования. По результатам опытов определялись стохастические параметры модели периодического смешения рассматриваемых компонентов.

Результаты расчетно-экспериментальных лабораторных исследований смешивания частиц полиэтилена и сажи показали, что можно улучшить качество смеси и получить коэффициент неоднородности 4,5 %, при этом сократив время смешивания до 110 секунд. При этом расход электроэнергии может быть сокращен в 2,2 раза. При этом площадь дна смесителя должна быть не менее 0,8 м². Рекомендуемая высота слоя смеси в начальный момент времени при выключенном двигателя должна составлять 7,5 – 8,5 см.

Режим вибрации лабораторной установки был следующий: амплитуда колебаний – 2 мм, частота колебаний – 30 Гц.

Следует отметить, что режим смешивания, обеспечивающий высокое качество процесса, реализуется при малых амплитудах и высоких частотах вибрации камеры смесителя.

4.2. Техничко-экономическое обоснование рекомендаций установки вибрационного смесителя

Экономическая эффективность установки вибрационного смесителя определяется по его влиянию на улучшение конечных показателей производства и на прирост прибыли за счет улучшения качества продукции, сокращения затрат труда и снижения себестоимости производства суперконцентрата. В нашем случае применим сравнительную экономическую оценку новой разработки с существующим вариантом смесителя.

Расчет единовременных затрат в рублях

$$Z_{\text{един}} = Z_{\text{изг}} + Z_{\text{м/д}} + Z_{\text{пуск}} \quad , \quad (4.1)$$

где $Z_{\text{изг}}$ – затраты на изготовление смесителя, $Z_{\text{м/д}}$ – затраты монтаж и демонтаж установок, $Z_{\text{пуск}}$ – затраты на пусконаладочные работы.

Затраты на изготовление установки складываются из зарат на заработную платы, стоимости материалов и деталей, накладных расходов.

Затраты на приобретение материалов и комплектующих в ценах на 1.01.2020 представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Материалы и комплектующие на изготовление смесителя

Наименование	Количество	Цена с НДС, руб/ед	Стоимость, руб
Труба	15 кг	65-00	975-00
Уголок 50 х50 х3	5 м	345-00	1725-00
Листовое железо, лист стальной 2 х 1000 х 1350, х/к	2 шт.	1487-00	3874-00
Подшипник	2 шт.	100-00	200-00
Пружины	4 шт.	275-00	1100-00
Электродвигатель	1 шт.	3000-00	3000-00
Пускатель	1 шт.	450-00	450-00
Прочее			1000-00
Итого			11424-00

Затраты на приобретение материалов и комплектующих с учетом транспортных и складских расходов (12, 5%) составят 14280 рублей.

Затраты на токарные, фрезерные, слесарные, сварочные и электромонтажные работы при времени изготовления смесителя 16 часов составят 3800 рублей. Накладные расходы (150 % от заработной платы) составят 5700 рублей.

Стоимость изготовления установки

$$Z_{\text{изг}} = 3800 + 14280 + 5700 = 23780 \text{ рублей}$$

Единовременные затраты с учетом затрат на демонтаж старой установки и монтаж новой (7% от стоимости изготовленного смесителя), затрат на пусконаладочные работы (5% от стоимости изготовления нового смесителя) составят

$$Z_{\text{един}} = 23789 \times 1.07 \times 1.05 = 26727 \text{ рублей}$$

Календарный фонд времени

$$T_{\text{календ}} = 252 \text{ дн} \times 8 \text{ час} = 2016 \text{ часов}$$

Часовая производительность старого смесителя 1500 кг/час.

Годовой выпуск продукции

$$Q_{\text{стар}} = 1,5 \times 2016 = 3024 \text{ тонны}$$

В связи с сокращением времени перемешивания сыпучих материалов в новом смесителе возможно увеличение выпуска продукции на 10 %. Следовательно, годовой выпуск продукции составит

$$Q_{\text{нов}} = 1,5 \times 2016 \times 1,1 = 3326,4 \text{ тонны}$$

Годовые производственные затраты

$$Z_{\text{произв}} = Z_{\text{зп}} + Z_{\text{ам}} + Z_{\text{рем}} + Z_{\text{эн}} + Z_{\text{накл}},$$

где $Z_{\text{зп}}$ - основная заработная плата производственных рабочих с отчислениями, руб.; $Z_{\text{ам}}$ - затраты на амортизацию смесителя, руб.; $Z_{\text{рем}}$ - затраты на ремонт и техническое обслуживание смесителя руб.; $Z_{\text{эн}}$ - затраты на электроэнергию, руб.; $Z_{\text{накл}}$ - накладные расходы, руб.

Основная заработная плата производственных рабочих с отчислениями

$$Z_{\text{зп}} = (T_{\text{ф}} + T_{\text{д}})K_{\text{отп}}K_{\text{соц}},$$

где $T_{\text{ф}}$ - тарифный фонд, руб.; $T_{\text{д}}$ - доплаты к тарифному фонду, 10% · $T_{\text{ф}}$, руб.; $K_{\text{отп}}$ - коэффициент, учитывающий отчисления на отпуск, 1,067; $K_{\text{соц}}$ - коэффициент, учитывающий отчисления на социальные нужды, 1,262.

Средний часовой тариф рабочего на предприятии «ДАСО» 153,5 руб/час. Тогда основная заработная плата составит

$$Z_{\text{зп}} = (153,5 \times 2016 + 15,35 \times 2016) \times 1,067 \times 1,262 = 458369 \text{ рублей}$$

Затраты на амортизацию

$$Z_{\text{ам}} = \frac{C_{\text{б}}N_{\text{ам}}}{100},$$

где $C_{\text{б}}$ - балансовая стоимость смесителя, $N_{\text{ам}}$ - норма амортизации, %.

Старый смеситель

$$Z_{\text{ам}} = \frac{320000 \cdot 10}{100} = 32000 \text{ рублей.}$$

Новый смеситель

$$Z_{\text{ам}} = \frac{26727 \cdot 10}{100} = 2673 \text{ рублей}$$

Затраты на техническое обслуживание и ремонт

$$Z_{\text{рем}} = \frac{C_{\text{б}}N_{\text{рем}}}{100},$$

где $N_{\text{рем}}$ – норма на техническое обслуживание и ремонт, %.

Старый смеситель

$$Z_{\text{рем}} = \frac{320000 \cdot 11}{100} = 35200 \text{ рублей.}$$

Новый смеситель

$$Z_{\text{рем}} = \frac{26727 \cdot 11}{100} = 2940 \text{ рублей.}$$

Затраты на электроэнергию

$$Z_{\text{ЭН}} = T_{\text{календ}} P_{\text{эл}} \Pi_{\text{эл}},$$

где $T_{\text{календ}}$ – календарный фонд времени, час; $P_{\text{эл}}$ – расход электроэнергии кВт/ч; $\Pi_{\text{эл}}$ – тариф на электроэнергию рублей за кВт/час для предприятий Ивановской области.

Затраты на электроэнергию при эксплуатации старого смесителя

$$Z_{\text{ЭН}} = 2016 \times 4,5 \times 7,24 = 65681 \text{ рубль.}$$

Затраты на электроэнергию при эксплуатации предлагаемого смесителя

$$Z_{\text{ЭН}} = 2016 \times 2,0 \times 7,24 = 29192 \text{ рубля.}$$

Накладные расходы принимаются в размере 150 % от заработной платы и составят 687554 рубля.

Общая сумма производственных затрат при эксплуатации старого смесителя составит

$$Z_{\text{произв}} = 458369 + 32000 + 35200 + 65681 + 687554 = 1278804 \text{ рубля,}$$

для нового смесителя

$$Z_{\text{произв}} = 458369 + 2673 + 2940 + 29192 + 687554 = 1180728 \text{ рублей.}$$

Затраты на производство одной тонны продукции:

для старого смесителя $1278804/3024=422,9$ руб/т,

для нового смесителя $1180728/3326,4=355$ руб/т.

Годовая ожидаемая прибыль при запланированной годовой загрузке смесителя составит

$$\text{Э}_{\text{год}} = (422,9 - 355) \times 3326,4 = 225863 \text{ рубля.}$$

4.4. Выводы по главе 4

1. Разработанные модели процесса смешения, методика определения стохастических параметров модели, программное обеспечение и решение на их основе конструкторский и проектных задач применялись на предприятии «ДАСО» (город Родники, Ивановская область).

2. Используя расчетно-экспериментальные исследования определения технологических показателей процесса смешивания была рекомендована установка вибрационного смесителя на линии производства суперконцентратов ГКТУ- 4000 и ГКТУ- 5000.

3. Ожидаемый экономический эффект от внедренного предложения составит 225863 рубля.

4. Результаты расчетно-экспериментальных лабораторных исследований смешивания частиц полиэтилена и сажи показали, что, заменив шнековый смеситель на вибрационный, можно улучшить качество смеси и уменьшив коэффициент неоднородности с 7,6 % до 4,5 %, при этом сократить время смешивания до 110 секунд вместо 2,5 минут. При этом расход электроэнергии может быть сокращен в 2,2 раза, а производительность смесителя увеличена на 10 %.

5. Режим смешивания, обеспечивающий высокое качество процесса, реализуется при малых амплитудах и высоких частотах вибрации камеры смесителя при производстве суперконцентрата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги исследования и рекомендации

1. Анализ современных работ, посвященных процессу смешивания сыпучих материалов, показал, что в качестве смесительного оборудования зачастую используются смесители принудительного действия, имеющие сложное аппаратное оформление и требующие использования электроприводов большой мощности. Применение вибрационных смесителей периодического и непрерывного действия имеет существенное преимущество, так как используются источники вибрации малой мощности. Однако влияние вибровоздействия на сыпучую среду, приводящее к эффекту ее виброоживления, на качество перемешивания частиц в виброоживленном слое не изучено.
2. На основе теории цепей Маркова предложены математические модели смешивания сыпучих сред в вибрационных смесителях периодического и непрерывного принципов действия, учитывающих параметры вибровоздействия аппарата на сыпучую среду.
3. Предложен расчетно-экспериментальный метод определения стохастических параметров модели смешивания из тестовых лабораторных опытов по виброклассификации сыпучих материалов.
4. Анализ результатов расчетно-экспериментальных исследований показал, что в промышленных условиях при смешивании частиц цемента и песка вибровоздействие камеры смешения на сыпучую среду, соответствует величине критерия Фруда $8,0 \leq Fr \leq 10,8$ при амплитуде колебаний $2 \pm 0,2$ мм и частоте колебаний 30 ± 5 Гц, которое обеспечит степень неоднородности готового продукта процесса смешивания менее 5 %.
5. Разработанные модели, программное обеспечение, решение на их основе конструкторских задач применялись в компании «ДАСО» ООО «РИМ». Была рекомендована установка вибрационного смесителя на линии производства суперконцентратов ГКТУ- 4000 и ГКТУ- 5000, что позволит при смешивании частиц сажи и полиэтилена и улучшить качество смеси и уменьшив коэффициент неоднородности с 7,6 % до 4,5 %, при этом сократив вре-

мя смешивания до 110 секунд вместо 2,5 минут. При этом расход электроэнергии может быть сокращен в 2,2 раза, а производительность смесителя увеличена на 10 %. Годовая ожидаемая прибыль при запланированной годовой загрузке смесителя составит 225863 рубля.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Планируется на основе разработанной методики расчета показателей процесса смешивания определение оптимальных технологических режимов вибрационных смесителей для предприятий, производящих сухие строительные смеси, обеспечивающих максимальное качество готовой продукции и максимальную производительность смесителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. – М.: Машиностроение. – 1973. – 216 с.
2. Кафаров В. В., Дорохов И. Н., Арутюнов С. Ю. Системный анализ процессов химической технологии. / Процессы измельчения и смешивания сыпучих материалов. – М.: Наука. – 1985. – 440 с
3. Обзор современных вибрационных смесителей сыпучих материалов и тенденции их развития / М.В. Коробчук, А.Н. Веригин // Южно-сибирский научный вестник. – 2020, – № 4 (32). – С. 34 – 45.
4. Богданов, В.С. Процессы в производстве строительных материалов и изделий / Учебник. В.С. Богданов, А.С. Ильин, И.А. Семикопенко // – Белгород: «Везелица». - 2007. - 512 с.
5. Непомнящий, Е.А. Некоторые результаты изучения кинетики сепарирования и смешивания дисперсных материалов / Е.А. Непомнящий // Инж.-физ. журнал. - 1967, т. 12. - № 5. – С. 583-591.
6. Непомнящий, Е.А. Кинетика некоторых процессов переработки дисперсных материалов / Е.А. Непомнящий // ТОХТ. – 1973, т. 7. – № 5. – С. 754 – 763.
7. Движение тонких слоев сыпучего материала по неподвижным поверхностям гравитационных смесителей и расходомеров./ Д.О. Бытев, А.И. 16. Зайцев, Ю.И. Макаров, В.А. Северцев. // Изд. вузов СССР. Химия и химическая технология. - 1980. - Т.23, №11. -С.1437-1441.
8. Огурцов, В.А. Моделирование кинетики виброгрохочения на основе теории цепей Маркова / В.А. Огурцов, С.В. Федосов, В.Е. Мизонов // Строит. материалы. – 2008. - № 5. – С. 33 – 35.
9. Carley-Machauly K.W., Donald, M.B. The mixing of solids in tumbling mixers-i [Tidsskrift] // Chemical Engineering Science. - 1962. - Vol. 17. - ss. 493-506.

10. Макаров Ю. И. Основные тенденции совершенствования отечественного оборудования для смешивания сыпучих материалов. / Ю.И. Макаров, Г.Д. Сальникова // Нефтяное и химическое машиностроение. – 1993. -№10. – С.5-8.
11. Determination of mixture inclination to segregation / V. Perschin , S. Borischnikova, A. Pasko, Y. Selivanow // Abstracts of papers World Congress on Particle Technology 3, Brighton, UK, 1998. –Р.173.
12. Федоренко, И.Я. Использование модели Лоренца для описания процесса смешивания сыпучих кормовых материалов / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков, Р.А. Котов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета.-2011.-№ 9.-С. 81-85.
13. Федоренко, И.Я. Оптимизация конструктивно-кинематических параметров вибрационного смесителя / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков, Р.А. Котов // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. 2011. - №12. - С.38-42.
14. Федоренко, И.Я. Оптимизация процесса вибросмешивания в смесителе с гибким рабочим органом / И.Я. Федоренко, Р.А. Котов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2015. - № 4. - С. 106-109.
15. Горшков, П.С. Новые способы комплексного снижения энергетических затрат при получении сухих строительных цементных смесей / П.С. Горшков, Н.П. Несмеянов, // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2012. - №2. – С. 49.
16. Горшков, П.С. Описание процесса изменения концентрации ключевого компонента при получении сухих строительных смесей/ П.С. Горшков, Н.П. Несмеянов, // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. - №1. – С. 45.
17. Баранцева, Е.А. Математическая модель кинетики лопастного перемешивания сыпучих материалов / Е.А. Баранцева, В.Е. Мизонов, С.В. Федосов, Ю.В. Хохлова // Строительные материалы. №2. - 2008. - С.12-13.

18. Котов, Р.А. Обоснование параметров вибрационного смесителя сыпучих кормов с гибким рабочим органом / Р.А. Котов//Дис. ...канд.техн.наук. Барнаул.: Алтайский государственный аграрный университет. - 2015, -163 с.
19. Сергеев Н.С. Теоретические предпосылки к обоснованию основных параметров вибрационного смесителя сыпучих кормов / Н.С. Сергеев, В.Н. Николаев // Вестник ЧГАУ. - 2000. - Т. 32. - С. 50-54.
20. Першин, В.Ф. Перспективы использования циркуляционных смесителей в промышленности/ В.Ф. Першин, Ю.Т. Селиванов, О.В. Демин// Химическая промышленность сегодня. 2003. № 11. С. 41 - 44.
21. Тихонов, О.Н. Закономерности эффективного разделение минералов в процессах обогащения полезных ископаемых / О.Н. Тихонов. – М.: Недра, 1984. - 208 с.
22. Макаров, Ю.И. Определение типа смесителей для сыпучих материалов с использованием номограммы / Ю.И. Макаров, С.С. Кашковский, И.И. Багринцев // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1980. - № 3. - С. 27—28.
23. Огурцов, В.А. Моделирование движения частиц при виброгрохочении на основе теории цепей Маркова / В.А. Огурцов, Е.Р. Горохова, А.В. Огурцов, П.А. Медведева // Строительство и реконструкция. – 2011. - №5(37). – С.85 – 88.
24. Спиваковский, А.О. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства / А.О Спиваковский, И.Ф. Гончаревич. - М.: Машиностроение, 1972. - 328 с.
25. Балагуров, И.А. Кинетика формирования многокомпонентных смесей разнородных дисперсных материалов /И.А. Балагуров// Дис. ...канд.техн. наук. Иваново.: ИГХТУ. – 2018,- 131с.
26. Технологические комплексы предприятий промышленности строительных материалов / Учебник. В.С. Богданов, С.Б. Булгаков, Г.Д. Федоров // – Белгород, «Везелица». - 2007. - 446 с.
27. Воронов, В.П. Спирально-лопастной противоточный смеситель для производства сухих строительных смесей / В.П. Воронов, Н.П. Несмея-

нов, П.С. Горшков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2012. - №1. – С. 66.

28. Кукта, Г.М. Вероятностные характеристики процесса смешивания кормов / Г.М. Кукта, В.П. Гуленко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - Киев: Урожай, 1984. - Вып. 59. – С. 36-38.

29. Мизонов, В.Е. Новый подход к моделированию и оптимизации процессов в сыпучих материалах / В.Е. Мизонов, В.П. Жуков, Е.А. Баранцева, Ю.В. Хохлова // Каталог 3-го Ивановского инновационного салона «Инновации-2006». – Иваново. – 2006. – С.119-120.

30. Баранцева, Е.А. Об оптимальных параметрах перемешивающей лопасти лопастного смесителя сыпучих материалов / Е.А. Баранцева, Ю.В. Хохлова, В.Е. Мизонов, Н. Berthiaux, С. Gatumel // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2008. – Т. 51. – Вып. 7. – С.108-110.

31. Мизонов, В.Е. Применение теории марковских цепей к моделированию механических процессов химической технологии / В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева, К. Marikh, Н. Berthiaux //Труды V Международной НК «Теоретические и экспериментальные основы создания новых высокоэффективных химикотехнологических процессов и оборудования». – Иваново: – 2001. -С.92-94.

32. Мизонов, В.Е. Об одном подходе к описанию кинетики / Процессы и аппараты химической технологии (явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование). В 5 Т. Т. 2. Механические и гидромеханические процессы / Д.А. Баранов, В.Н. Блиничев, В.Е. Мизонов и др.; под ред. А.М. Кутепова. – М: ЛОГОС, 2001. – 600 с.

33. Мизонов, В.Е. К расчету центробежных классификаторов порошкообразных материалов / В.Е Мизонов, С.Г. Ушаков // Теоретические основы химической технологи. – 1980. – т.14. – №5. – С. 784–786.

34. Мизонов, В.Е. Аэродинамическая классификация тонкодисперсных сыпучих материалов и оборудование для ее реализации / В.Е Мизонов, С.Г. Ушаков // Химия и нефтяное машиностроение. – 1990. – №1. – С. 7–12.

35. Мизонов, В.Е. Обратная задача фракционирования порошков / В.Е Мизонов, Е.В. Барочкин, С.Г. Ушаков // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 1986. – т.29. – № 2. – С. 125–127.
36. Мизонов, В.Е. Связь функциональных и критериальных характеристик процесса классификации / В.Е Мизонов // Интенсивная механическая технология сыпучих материалов. – Иваново, 1990. – С. 80–84.
37. Мизонов, В.Е. Стохастическая модель равновесной классификации порошков / В.Е Мизонов // Теоретические основы химической технологи. – 1984. – т.18. – №6. – С . 811– 815.
38. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Т. IV-12/ М.Б. Генералов, В.П. Александров, В.В. Алексеев и др.; Под общ. ред. М.Б. Генералова. – М.: «Машиностроение», 2004. – 832 с.
39. Кондратьев, А.В. Просеиваемость гравия по длине сортировки в зависимости от фракционного состава смеси / А.В. Кондратьев, С.М. Кочкян, В.А. Русинкевич, А.К. Абдуллах // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2014. № 7. С. 139-143.
40. Бауман, В.А. Вибрационные машины и процессы в строительстве: учеб. пособие для студентов строительных и автомобильно- дорожных вузов / В.А. Бауман, И.И. Быховский. – М.: Высш. шк., 1977. - 255 с.
41. Бобков, С.П. Использование дискретных стохастических моделей в химической кинетике/ С.П. Бобков, Е.С. Бобкова, В.В. Рыбкин // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. № 9. С. 35-39.
42. Членов, В.А. Виброкипящий слой / В.А. Членов, Н.В. Михайлов. - М.: Наука, 1972. - 340 с.
43. Математическая модель кинетики лопастного перемешивания сыпучих материалов / Е.А. Баранцева, В.Е. Мизонов, С.В. Федосов, Ю.В. Хохлова // Строительные материалы. – 2008.- №2.- С. 12-13.

44. Гриценко, М.А. Исследование сегрегации частиц в виброожиженном слое при грохочении сыпучих материалов с высоким содержанием мелких фракций в исходном сырье / М.А. Гриценко, А.П. Алешина, Е.Р. Брик, В.А. Огурцов // Вестник МГСУ. - №1. – 2017. – С. 70 – 76.
45. Балагуров, И.А. К расчету характеристик виброожиженного слоя сыпучего материала/ И.А. Балагуров, М.А. Гриценко, В.Е. Мизонов, В.А. Огурцов// Вестник ИГЭУ. – Вып. 4 – 2015. – С. 55-58.
46. Пономарев, Д.А. Нелинейная математическая модель транспорта сыпучего материала в лопастном смесителе/ Д.А. Пономарев, В.Е. Мизонов, А. Бертье, Е.А. Баранцева// Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. — 2003.-Т. 46.- Вып. 5. С.157-159.
47. Клишин, С.В. Применение метода дискретных элементов при анализе гравитационного движения гранулированного материала в сходящемся канале /С.В. Клишин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - № 12, 2009. - С. 273- 277.
48. Веригин А.И., Коробчук М.В., Джангирян А.В. Динамика смешивания бинарных композиций дисперсных частиц // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) - 2010. - №8 (34) . - С. 63-67.
49. Коробчук М.В., Веригин А.Н Применение эффекта нелинейных колебаний для смешивания тонкодисперсных материалов. // Альтернативная энергетика и экология. -2012.-№ 1/2012. - С. 178-183.
50. Блехман, И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе // Изд. Наука. М.: - 1964. - 410 с.
51. Мизонов, В.Е. Применение теории цепей Маркова к моделированию кинетики измельчения в трубных мельницах замкнутого цикла /В.Е. Мизонов, С.В. Федосов, С.Ф. Смирнов, А.Г. Красильников //«Строительные материалы». - 2007. №10. С. 41 - 45.
52. Огурцов, А.В. Моделирование поля концентраций частиц в цилиндрическом аппарате кипящего слоя на основе теории цепей Маркова / А.В.

Огурцов, А.В. Митрофанов, В.А. Огурцов // Тезисы Междунар. НТК “Состояние и Перспективы развития энерготехнологий (Бенардосовские чтения)”, Иваново, 2006, С.52.

53. Огурцов, А.В. Нелинейная ячеечная модель эволюции взвешенного слоя / А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, В.А. Огурцов // XVII Межд. НТК «Математические методы в технике и технологиях» – ММТТ2006.- Воронеж.- 2006.- С.39-40.

54. Огурцов, А.В. Ячеечная модель расчёта концентраций материала во взвешенном слое /А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, В.А. Огурцов // XX Межд. НТК «Математические методы в технике и технологиях». – ММТТ2007, т.5, Ярославль.- 2007.- С.286.

55. Вибрация в технике. Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет.: В.Н. Челомей // М.: Машиностроение. – 1981. (Т. 4. Вибрационные процессы и машины. Под ред. Э.Э. Лавендела, - 509 с.)

56. Спиваковский, А.О. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства / А.О Спиваковский, И.Ф. Гончаревич. - М.: Машиностроение, 1972. - 328 с.

57. Баранцева, Е.А. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет / Е.А. Баранцева, В.Е. Мизонов, Ю.В.Хохлова// ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново. 2008. - 116 с.

58. Баранцева, Е.А. Кинетика перемешивания сыпучих материалов в лопастном смесителе непрерывного действия /Е.А. Баранцева// Строительные материалы. 2008. - №8- С.69-71.

59. Александровский А.А. Исследование процесса смешения и разработка аппаратуры для приготовления композиций, содержащих твердую фазу: Авторефер. дис. докт. техн. наук. /Александровский А.А. - Казань,1976.-48с.

60. Алешина, А.П. Расчетно-экспериментальное исследование сегрегационного механизма миграции ансамбля частиц в слое сыпучего материала при виброгрохочении / А.П. Алешина, В.А. Огурцов, М.А. Гриценко, А.В.

Огурцов // Вестник ИГЭУ. – Вып. 1 – 2015. – С. 50-54.

61. Огурцов, В.А. Ячеечная модель псевдооживления в технологии производства строительных материалов / В.А. Огурцов, А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, А.П. Алешина // Строительство и реконструкция. - Вып. 5 (43). – 2012. – С. 68-74.

62. Селиванов, Ю.Т. Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств /Ю. Т. Селиванов, В. Ф. Першин. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 120 с.

63. Богданов В.С. Определение оптимальных параметров электропривода планетарного смесителя. / Богданов В.С., Семернин А.Н., Анциферов С.И., Колесник В.А. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. № 6. С. 190-195.

64. Богданов В.С. Разработка SCADA-системы для управления планетарным смесителем / Богданов В.С., Семернин А.Н., Анциферов С.И., Колесник В.А. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. - № 1. – С. 76-81.

65. Sommer K. Mixing of Particulate Solids. KONA Powder and Particles, No.14,1996, pp. 73-78.

66. Tamir A. Applications of Markov Chains in Chemical Engineering. Elsevier publishers, Amsterdam, 1998, 604 p.

67. Бакин М.Н. Современные аппараты с подвижной лентой для смешивания сыпучих материалов / М.Н. Бакин, А.Б. Капранова, И.И. Верлока // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5 (ч. 4). – С. 687–691.

68. Бакин М.Н. Исследование распределения сыпучих компонентов в рабочем объеме барабанно-ленточного смесителя / М.Н. Бакин, А.Б. Капранова, И.И. Верлока // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5(ч. 5). – С. 928–933.

69. Верлока, И.И. Современные гравитационные устройства непрерывного действия для смешивания сыпучих компонентов / И.И. Верлока, А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4; URL: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2599.

70. Лебедев, А.Е. Метод оценки коэффициента неоднородности смесей

сыпучих сред / А.Е. Лебедев, А.И. Зайцев, А.А. Петров // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4; URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2556.

71. Зимин, А.Ф. К расчету основных параметров машин для диспергирующего смешивания, оснащенных установленными в наклонной плоскости лезвийными рабочими органами / А.Ф. Зимин // Хранение и переработка сельхозсырья. – 1998, –№ 5.

72. Ким, В.С. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс / В.С. Ким, В.В. Скачков. – М. : Химия, 1988. – 240 с.

73. Зайцев, А.И. Ударные процессы в дисперсно-пленочных системах / А.И. Зайцев, Д.О. Бытев. - М. : Химия, 1994. - 196 с.

74. Капранова, А.Б. Стохастическое описание движения осветленной фракции суспензии порошков / А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев, Д.О. Бытев, А.И. Зайцев // Изв. ВУЗов. Химия и хим. технология. Иваново. – 2004. Т. 47, № 6. – С. 99-101.

75. Капранова, А.Б. К расчету объемной доли сыпучего компонента при порционном смешивании в гравитационном устройстве / А.Б. Капранова, И.И. Верлока, П.А. Яковлев, С.В. Филиппов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-30: сб. трудов 30-й Междунар. науч. конф. в 12 т. / под общ. ред. А.А. Большакова. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – Т. 9. – С. 64-66.

76. Исследование ударного смешивания твердых дисперсных сред при вторичных столкновениях частиц / А.Б. Капранова, М.Н. Бакин, А.Е. Лебедев, А.И. Зайцев // Изв. ВУЗов. Химия и хим. технология. Иваново. – 2013. Т. 56, № 6. – С. 83-86.

77. Земцова, Е.В. Использование цепей Маркова для моделирования процесса смешивания / Е.В. Земцова, А.В. Фетисов, А.С. Дурнев // Современные наукоемкие технологии. - 2013. - № 8. – С. 196–197.

78. Смолин, Д.О. Перспективы применения теории цепей маркова для построения математической модели смешивания сыпучих материалов / Д.О.

Смолин // Современные наукоемкие технологии. - 2012; URL: <https://www.sworld.com.ua/konfer29/681.pdf>.

79. Дурнев, А.С. Применение теории цепей Маркова к моделированию процесса смешивания в гладком вращающемся барабане / А.С. Дурнев, В.Ф. Першин // Вестник Тамб. гос.техн. ун-та, 2013. – Т. 19, № 4. – С. 783–792.

80. Капранова, А.Б. Смешивание сыпучих материалов в формализме процесса Орнштейна-Уленбека / А.Б. Капранова, И.И. Верлока, А.Е. Лебедев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: сб. трудов 28-й Междунар. науч. конф. в 12 т. – Т. 8. – Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2015; Ярославль : Ярослав. гос. техн. ун-т; Рязань : Рязанск. гос. радиотехн. ун-т, 2015. – С. 219-223.

81. Unger, D.R. Laser-induced fluorescence technique for the quantification of mixing in impinging jets / D.R. Unger, F. J Muzzio // AIChE Journal. – 1999. – V. 45. – P. 2477.

82. Sekulic, S.S. On-Line Monitoring of Powder Blend Homogeneity by Near-Infrared Spectroscopy / S.S. Sekulic, H.W. Ward, D.R. Brannegan, E.D. Stanley, C.L. Evans, S. T. Sciavolino, P. A. Hailey, P. K. Aldridge // Anal. Chem. – 1996. – V. 68. – P. 509.

83. Kalyon, D.M. Effects of air entrainment on the rheology of concentrated suspensions during continuous processing / D.M. Kalyon, R. Yazici, C. Jacob, B. Aral, S. W. Sinton // Polym. Eng. Sci. – 1991. – V. 31. – P. 1386.

84. Kalion, D.M. An experimental study of distributive mixing in fully intermeshing, co-rotating twin screw extruders / D.M. Kalion, H.N. Sangani // Polym. Eng. Sci. – 1989. – V. 29. – P. 1018. 100 Yazici, R. Degree of mixing analysis of concentrated suspensions by electron probe and X-ray diffraction / R. Yazici, D.M. Kalion // Rubber Chem. Technol. – 1993. – V. 66. – P. 527.

85. Королев, Л.В. Метод оценки качества смешения сыпучих материалов по распределению частиц в плоском сечении рабочего объема / Л.В. Королев, М.Ю. Таршис // Изв. ВУЗов. Химия и хим. технология. Иваново. – 2002. Т. 45, № 1. – С. 98-100.

86. Лебедев, А.Е. Аппараты для переработки дисперсных сред. Теория и расчет. Монография / А.Е. Лебедев, А.И. Зайцев, А.Б. Капранова, А.А. Вагагин, С. Суид. – Ярославль : Издат. дом ЯГТУ, 2017. – 176 с. ISBN 978-5-9914-0585-0.
87. Верлока, И.И. Применение экспресс-метода оценки показателей качества двухкомпонентных сыпучих смесей / И.И. Верлока, А.Е. Лебедев // 68–я Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием: сб. матер. конф. – Ярославль : Издат. Дом ЯГТУ, 2015. – С. 427-429.
88. Бакин М.Н. Изучение процессов смешивания сыпучих материалов в аппарате с подвижной лентой и гибкими рабочими элементами / М.Н. Бакин, А.Б. Капранова, А.И. Зайцев // Изв. ВУЗов. Химия и хим. технология. Иваново. – 2014. Т. 57, № 10. – С. 82-84.
89. Бакин М.Н. Экспериментальное исследование смешения сыпучих материалов в новом аппарате с подвижной лентой / М.Н. Бакин, А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев // 67–я Всеросс. науч.-техн. конф. ЯГТУ студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием: тез. докл. – Ярославль, 2014. – С. 236
90. Верлока, И.И. К вопросу об опытных исследованиях процесса формирования разреженных потоков сыпучих сред щеточными элементами / И.И. Верлока, А.Б. Капранова // 69–я Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием (20 апреля 2016 г.): сб. материалов конф. [Электронный ресурс]. – Ярославль : Издат. Дом ЯГТУ, 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 471-472.
91. Верлока, И.И. К анализу данных экспериментальных исследований рассеивания твердых частиц билами гравитационного смесителя / И.И. Верлока, А.Б. Капранова // Юбилейная 70–я всеросс. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием «Научно-технические и инженерные разработки – основа решения современных экологических проблем» (19 апреля 2017 г.): сб. материалов конф.: В 3 ч. Ч. 2

- [Электронный ресурс]. – Электронные текстовые данные. – Ярославль : Издат. дом ЯГТУ, 2017. – 791 с. – 1 электрон. опт. диск (CDROM). – С. 25-26.
92. Верлока, И.И. Экспериментальное исследование получения качественной сыпучей смеси продуктов растениеводства / И.И. Верлока, П.А. Яковлев, А.Б. Капранова // Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства - МНТС Тимирязев-2018: сб. научн. трудов Междунар. науч.техн. семинара, посвящ. 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (22-23 мая 2018 года). / М. : Изд-во «Перо», 2018. – С. 207-210. 126
93. Пат. на полезную модель 83197 Российская Федерация, В 01 F 11/00. Смеситель сыпучих материалов / Баранцева Е.А., Мизонов В.Е., Хохлова Ю.В., Огурцов В.А.; заявитель и патентообладатель ИГЭУ; опубл. 10.05.09, Бюл. № 13. – 2 с.
94. Пат. на полезную модель 86890 Российская Федерация, В 01 F 7/04. Лопастной смеситель сыпучих материалов / Баранцева Е.А., Мизонов В.Е., Хохлова Ю.В., Огурцов В.А.; заявитель и патентообладатель ИГЭУ; опубл. 20.09.09, Бюл. № 26. – 2 с.
95. Пат. на полезную модель 88284 Российская Федерация, В 01 F 7/04. Лопастной смеситель сыпучих материалов / Баранцева Е.А., Мизонов В.Е., Хохлова Ю.В., Огурцов В.А.; заявитель и патентообладатель ИГЭУ; опубл. 10.11.09, Бюл. № 31. – 2 с.
96. Баранцева, Е.А. Роль лопастного перемешивания в формировании качества смесей сыпучих материалов с малым содержанием ключевого компонента / Е.А. Баранцева // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. 2009.-Т. 52.- Вып. 1. - С. 102-104.
97. Баранцева, Е.А. Об оптимальной подаче сегрегирующего ключевого компонента в смеситель периодического действия / Е.А. Баранцева // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. 2009. - Т. 52. - Вып. 8. - С. 122123.
98. Пат. на полезную модель 139473 Российская Федерация, В 01 F 9/06. Смеситель сыпучих материалов [Текст] / Мизонов В.Е., Балагуров И.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВПО Ивановский государственный

энергетический университет; опубл. 20.04.14, Бюл. 11. - 1 с.

99. Berthiaux, H. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology // H. Berthiaux, V. Mizonov, V. Zhukov // Powder Technology, 157(2005). –P. 128-137.

100. Zhao, L., Zhao, Y., Liu, C., Li, J., Dong, H. Simulation of screening process on a circularly vibrating screen using 3D-DEM // Mining Science and Technology, V. 21, Issue 5, 2011, pp. 677-680

101. Chen, Y., Tong, X. Application of the DEM to screening process: a 3D simulation // Mining Science and Technology, V.19, Issue 4, 2009, pp. 493-497

102. Webb, J. Li, C., Pandiella, S.S., Campbell, G.M. Discrete particle motion on sieves—a numerical study using the DEM simulation // Powder Technology, V.133, Issues 1–3, 2003, pp. 190-202.

103. Mizonov, V. Theoretical study of superposition of macro- and micro-scale mixing and ITS influence on mixing kinetics and mixture quality / V. Mizonov, H. Berthiaux, E. Barantseva, C. Gatumel, Y. Khokhlova // Proc. of the International Symposium on Reliable Flow of Particulate Solids IV (RELPOWFLO IV). – CD edition. – Tromso. – Norway. – 2008.

104. Козлов В.В. Сухие строительные смеси: Учебное пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 96 с.

105. Вареных Н.М. Химико-технологические агрегаты смешивания дисперсных материалов/ Н.М. Вареных, А.Н. Веригин, В.Г. Джангриян. - СПб.: Изд. С.-Петербургского ун-та, 2000. - 340 с. 53

106. Бытев Д.О. Стохастическое моделирование процессов смешения сыпучих материалов. / Д.О. Бытев // Технология сыпучих материалов: Тез. докл. Всесоюзн. конф - Ярославль, 1989. - Т. II. - С. 49—50.

107. Голиакберов З.К. Математическое моделирование совмещенного процесса смещения и сушки. / З.К. Голиакберов, Л.Г. Голубев, А.К. Лодыгин // Технология сыпучих материалов: Тез. докл. Всесоюзн. конф - Ярославль, 1989. - Т. II. - С. 130.

108. Уваров, В.А. Определение сил в смесителе с изменяемой рабочей камерой периодического действия / В.А. Уваров, Н.М. Лозовой// Вестник БГТУ. 2012 №1. – С. 79-81.

109. Хохлова, Ю.В. Математическая модель смесителя непрерывного действия с неоднородным потоком сыпучего материала / Ю.В.Хохлова, В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева, Н. Berthiaux, С. Gatumel // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50. – Вып. 9. – С.118-120.

110.Хохлова, Ю.В. Влияние сегрегации трассера на трассирование неоднородного потока сыпучего материала / Ю.В.Хохлова, В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева, Н. Berthiaux, С. Gatumel // Вестник ИГЭУ. – Вып.3 – 2007. – С.15-17.

111.Хохлова, Ю.В. Распределение времени пребывания частиц в смесителе непрерывного действия с неоднородным потоком / Ю.В. Хохлова, В.Е. Мизонов. //Тезисы 13-ой МНТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Т.2. – Москва. – МЭИ. – 2007. – С.466-467.

112.Хохлова, Ю.В. Влияние сегрегации трассера на кривые отклика в непрерывном смесителе с неоднородным потоком / Ю.В. Хохлова, В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева, Н. Berthiaux, С. Gatumel // Тезисы 14-ой МНТК «Состояние и перспективы развития энерготехнологии – 14-ые Бенардосовские чтения». –Иваново. – 2007. – С.176.

113. Штербачек З. Перемешивание в химической промышленности/ З. Штербачек, П. Тауск - Л.: Госхимиздат, 1963.-416 с.

114. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. / Ф. Стренк - Л.: Химия, 1975. - 384с.

115. Кафаров В.В. Процессы перемешивания в жидких средах. / В.В. Кафаров - М.;Л.: 1949. - 88с.

116. Пат. на полезную модель 119642 Российская Федерация, В 01 F 13/08. Смеситель сыпучих материалов / Мизонов В.Е., Казаков Ю.Б., Шелатонова К.А., Балагуров И.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВПО

Ивановский государственный энергетический университет; опубл. 27.08.12, Бюл. 26. - 2 с.

118. Пат. на полезную модель 139473 Российская Федерация, В 01 F 9/06. Смеситель сыпучих материалов / Мизонов В.Е., Балагуров И.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВПО Ивановский государственный энергетический университет; опубл. 20.04.14, Бюл. 11. - 1 с.

119. Пат. на полезную модель 140835 Российская Федерация, H02K 26/00, H02K 29/10. Торцевой вентиляльный двигатель с полым ротором [Текст] / Казаков Ю.Б., Балагуров И.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВПО Ивановский государственный энергетический университет; опубл. 20.05.14, Бюл. 12. -2 с.

120. Свид. о государств. регистр. программы для ЭВМ 2014616143. Моделирование кинетики формирования трехкомпонентной смеси сегрегирующих сыпучих материалов / Мизонов В.Е., Балагуров И.А.; правооблад. ГОУВПО Ивановский государственный энергетический университет; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 09.09.14

121. Балагуров, И.А. Моделирование кинетики смешивания разнородных сыпучих материалов / И.А. Балагуров, В.Е. Мизонов, Н. Berthiaux, С. Gatumel // Вестник ИГЭУ. – 2014. – вып. 6. – С. 67 – 70.

121. Мизонов, В.Е. Математическая модель формирования многокомпонентной смеси сегрегирующих компонентов/ В.Е. Мизонов, И.А. Балагуров, А.В. Митрофанов // Изв. Вузов: Химия и хим. Технология – 2014. – Т. 57. – вып. 8. – С. 67 – 70.

122. Mizonov, V.E. Theoretical search for optimum hold-up in a batch mixer of particulate solids / V.E. Mizonov, I.A. Balagurov, N. Berthiaux, C. Gatumel // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. – 2018. – Vol. 61. – N.4-5. – P. 93-97.

123. Мизонов, В.Е. Влияние многослойной загрузки разнородных зернистых материалов в смеситель периодического действия на кинетику и производительность смешивания / В.Е. Мизонов, И.А. Балагуров, Н. Berth-

iaux, C. Gatumel // Изв. Вузов: Химия и хим. Технология – 2016. – Т. 59. – вып. 10. – С. 54 – 60.

124. Жуков, В.П. Моделирование и расчет совмещенных процессов на основе уравнения Больцмана / В.П. Жуков, А.Н. Беляков // Изв. ВУЗов. Химия и хим. технология. Иваново. – 2010. Т. 53, № 11. – С. 114-117.

125. Жуков, В.П. Моделирование совмещенных гетерогенных процессов на основе дискретных моделей уравнения Больцмана / В.П. Жуков, А.Н. Беляков // Теор. основы хим. технологии. – 2017. – Т. 51. – №1. – С. 78-84.

126. Беляков, А.Н. Моделирование механических процессов в струйной мельнице кипящего слоя на основе уравнения Больцмана / А.Н. Беляков, В.П. Жуков В.П., Н. Otwinowski, D. Urbaniak // Вестн. ИГЭУ. – 2011. – № 2. – С. 68-70.

127. Балагуров, И.А. Кинетика формирования многокомпонентных смесей разнородных дискретных материалов / И.А. Балагуров // Дис....канд.техн.наук. Иваново.: Ивановский химико-технологический университет. - 2018, -131 с.

128. Хохлова, Ю.В. Исследование процессов смешивания сыпучих материалов в лопастных смесителях непрерывного действия / Ю.В. Хохлова // Дис....канд.техн.наук. Иваново.: Ивановский химико-технологический университет. - 2009, -114 с.

129. Баранцева, Е.А. Процессы смешивания сыпучих материалов: новые методы моделирования, расчета и оптимизации / Е.А. Баранцева // Дис....доктор. техн.наук. Иваново.: Ивановский химико-технологический университет. - 2009, -324 с.

130. Богданов, В.С. Процессы в производстве строительных материалов / В.С. Богданов, Д.В. Богданов, И.А. Семикопенко// - Старый Оскол. - 2018, - 436 с.

131. Богданов, В.С. Процессы в производстве строительных материалов и изделий / Учебник. В.С. Богданов, А.С. Ильин, И.А. Семикопенко // – Белгород: «Везелица». - 2007. - 512 с.

132. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.

133. Ahmed M.M. Effects of comminution on particle shape and surface roughness and their relation to flotation process // International Journal of Mineral Processing. – 2010. – Vol. 94, No. 3–4. – P. 180–191.

134. Particle shape effects in flotation. Part 1: Microscale experimental observations / D.I. Verrelli, W.J. Bruckard, P.T.L. Koh, et. al. // Minerals Engineering. – 2014. – Vol. 58. – P. 80–89.

135. Ulusoy U., Hiçyılmaz C., Yekeler M. Role of shape properties of calcite and barite particles on apparent hydrophobicity // Chemical Engineering and Processing. – 2004. – Vol. 43, No. 8. – P. 1047–1053.

136. Arratia, P.E. A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle Tote blender via DEM simulations / P.E. Arratia, Nhathang Duong, F.J. Muzzio, P. Godbole, S. Reynolds // Powder Technology. 2006. – Vol. 164 – p.50-57.

137. Kaneko Y., Shiojima, T., Horio, M. Numerical analysis of particle mixing characteristics in a single helical ribbon agitator using DEM simulation [Tidsskrift] // Powder Technology. - 2000. - 1 : Vol. 108. - pp. 55-64

138. Bertrand F., Leclaire, L.-A., Levecque, G. DEM-based models for the mixing of granular materials [Tidsskrift] // Chemical Engineering Science. - 2005. - 8-9 : Vol. 60. - ss. 2517-2531.

139. Огурцов, В.А. Моделирование процессов получения сухих строительных смесей в лопастном аппарате непрерывного действия / В.А. Огурцов, Ю.В. Хохлова, А.П. Алешина, А.М. Фатахетдинов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: «Материалы. Конструкции. Технологии», №2 (10), Йошкар-Ола. 2019. С. 30-36.

140. Огурцов, В.А. Имитационная модель движения ансамбля частиц по ситовому тканому полотну при вибросепарации / В.А. Огурцов, А.П. Алешина, Е.Р. Брик, А.М. Фатахетдинов // Изв. Вузов. Технология тек-

стильной промышленности. – 2018, № 3. С. 279 – 281. (издание, индексируемое Scopus).

141. Огурцов, В.А. Двухмерная модель фракционирования мелкодисперсных сыпучих материалов на ситовых тканях / В.А. Огурцов, Е.И. Купнов, А.П. Алешина, А.В. Огурцов, А.М. Фатахетдинов // Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 1. С. 133 – 137. (издание, индексируемое Scopus).

142. Огурцов, В.А. Расчет распределения частиц по времени пребывания на поверхности вибрационного грохота / В.А. Огурцов, А.В. Огурцов, А.П. Алешина, А.М. Фатахетдинов // Вестник ИГЭУ. - Иваново. – 2016, №6. С. 71-74.

143. Огурцов, В.А. Ячеечная модель смешивания в технологии производства сухих строительных смесей/ В.А. Огурцов, Ю.В. Хохлова, Е.Р. Брик, А.М. Фатахетдинов, А.В. Огурцов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: «Материалы. Конструкции. Технологии», №1 (17), Йошкар-Ола. 2021. С. 62 – 69.

144. Огурцов, В.А. Моделирование кинетики виброгрохочения в слое переменной высоты /В.А. Огурцов, А.П. Алешина, Е.Р. Брик, А.М. Фатахетдинов //Надежность и долговечность машин и механизмов: сб.материалов VI Всероссийской научн.-практ. конф. Иваново: ИИГПС МЧС, 2015. С. 10-12.

145. Огурцов, В.А. Моделирование процесса транспортирования сыпучей среды на ситовых тканых полотнах виброгрохота / В.А. Огурцов, А.П. Алешина, Е.Р. Брик, А.М. Фатахетдинов //Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы. SMARTEX – 2016: сб. материалов XIX практич. форума. Иваново: ИВГПУ. Ч.1. 2016. С. 379 – 382.

146. Фатахетдинов, А.М. Транспортирование ансамбля частиц по ситы вибрационного грохота / А.М. Фатахетдинов, А.Н. Логинова //Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (Поиск-2017): сб.

материалов межвузовской. науч.-техн. конф. Иваново: ИВГПУ. Ч.2. 2017. С. 501-502.

147. Гриценко, М.А. Описание движения частицы по поверхности грохота, совершающего горизонтальные колебания / М.А. Гриценко, А.М. Фатахетдинов, А.В. Огурцов // Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (Поиск-2018): сб. материалов межвузовской. науч.-техн. конф. Иваново: ИВГПУ. 2018. С. 299-300.

148. Варенцова, Э.С. Влияние характеристик виброожиженного слоя на технологические параметры процесса грохочения / Э.С. Варенцова, А.М. Фатахетдинов // Энергия 2019: материалы XIV Всероссийской (международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Иваново: ИГЭУ, 2019. Т. 4. С.138

ПРИЛОЖЕНИЯ

Модель периодического смешивания

```

%batch mixing
clear all
c=2; %число компонентов
m=5; %число ячеек
%начальный вектор состояния системы
S0=[1 0
    1 0
    0 1
    0 1
    0 1];
%скорость сегрегации
v=[0.03 0
   0.03 0
   0.0 0
   0.0 0
   0.0 0];
%коэффициент диффузии
d=[0.04
   0.04
   0.04
   0.04
   0.04];
N=120; %число переходов
%начальное распределение компонентов, записанное в виде матрицы
for n=1:c;
SC(:,n,1)=S0(:,n);
end

for k=1:N;
%построение матрицы переходных вероятностей
M=zeros(m,m,c);
for n=1:c;
for j=1:m-1;
if (n~=c && n==(c-1));
M(j,j+1,n)=d(n,1);
M(j+1,j,n)=d(n,1)+(1-
sum(SC(j+1,1:n,k)))*((SC(j+1,1:c,k)*v(1:c,n))/(sum(SC(
j+1,1:c,k))));
end
if n==(c-1);
M(j,j+1,n)=d(n,1);

```



```

M(j+1,j,n)=d(n,1)+v(c,n)*(1-sum(SC(j+1,1:n,k)));
end
if M(j+1,j,n)<0;
M(j+1,j,n)=0;
end
M(j,j+1,c)=d(c,1);
M(j+1,j,c)=d(c,1);
end
for j=1:m;
M(j,j,n)=1-sum(M(:,j,n));
end
%текущий вектор состояния системы
SC(:,n,k+1)=M(:, :, n)*SC(:,n,k);
end
for j=1:m-1;
ds(j,k+1)=1-sum(SC(j,1:c,k+1));
if ds(j,k+1)<=0;ds(j,k+1)=0;end
for n=2:c;

SC(j,n,k+1)=SC(j,n,k+1)+ds(j,k+1)*SC(j+1,n,k+1)/sum(SC
(j+1,2:c,k+1));
end
for n=2:c;
SC(j+1,n,k+1)=SC(j+1,n,k+1)-
ds(j,k+1)*SC(j+1,n,k+1)/sum(SC(j+1,2:c,k+1));
end
end
SC(m,c,k+1)=1-sum(SC(m,1:c-1,k+1));
end

for j=1:N
A(:,j)=SC(:,1,j); %векторы состояния компонента 1 с
течением времени
B(:,j)=SC(:,2,j); % векторы состояния компонента 2 с
течением времени
end
l=std(A); %эволюция качества смеси
% построение эволюции вектора состояния компонента 1
figure(1)
bar3(A)
axis square
%построение эволюции вектора состояния компонента 2
figure(2)
bar3(B)
axis square

```

```

%построение кривой качества смеси
figure(3)
plot(1, 'k')
grid on

clear all
m=3;
n=3;N=m*n;
vf=[0 0 0 0 0 0 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2];for
j=1:m;v(j)=vf(m+1-j);end
vmean=sum(v)/m;Tfl=n/vmean
dy=0.05; % diffu-
sion coefficient
dx=0.05;
vtr=0.0; % velocity of
segregation
if vtr>=0;vd=1;vu=0;else vd=0;vu=1;end
M=zeros(N,N);
P=zeros(N,N);
for i=1:N-m;
    P(i,i+m)=dx;

end
for i=1:N-m
    P(n+i,i)=dx;
end
for i=1:N-1
    P(i,i+1)=dy;

end
for i=2:N
    P(i,i-1)=dy;
end

for i=1:N-1
    P(i,i+1)=vtr+dy;
end
P=P
for i=1:N-m
    P(i,i+m)=vf(i);

```

```

end
for j=1:N;
    P(j,j)=1-sum(P(:,j));
end
P
for j=2:N;M(j-1,j)=dy+abs(vtr)*vu;end;for i=1:n;for
j=2:N;if j==1+m*i;M(j-1,j)=0;end;end;end
for j=1:N-1;M(j+1,j)=dy+abs(vtr)*vd;end;for i=1:n;for
j=2:N-1;if j==m*i;M(j+1,j)=0;end;end;end
M
for j=m+1:N;M(j-m,j)=dx;end;
M
for i=1:n-1;for j=1:m;M(j+m+m*(i-1),j+m*(i-
1))=v(j)+dx;end;end
for j=1:m;M(N-m+j,N-m+j)=M(N-m+j,N-m+j)-v(j);end

for j=1:N;M(j,j)=1-sum(M(:,j));end
M
S0=zeros(m,n);for j=1:m;S0(1,1)=1;end
for j=1:n;
    for i=1:m;
        s0(m*(j-1)+i,1)=S0(i,j);
    end;
end;
s0=s0;
S(:,1)=s0;
k=100;
for i=1:k
    S(:,i+1)=P*S(:,i);
    q(i+1)=(sum(S(N-m+1:N,i).*v'))./sum(v);
    figure (56)
    l(i)=(std(S(N-m+1:N,i)));

    S(N-m+1:N,i)
    hold on
end
for i=1:k+1;t(i)=i-1;end
Tm=q*t'
```

Модель непрерывного смешивания

```

clear all
m=3; % число ячеек цепи по вертикали
n=4; % число ячеек цепи по горизонтали
N=m*n;
vf=[.02 .02 .02]; % скорость потока материала
for j=1:m;
    v(j)=vf(m+1-j);
end
dy=0.01; dx=0.01; % коэффициенты диффузии
vtr=0; % скорость сегрегации
if vtr>=0; vd=1; vu=0; else vd=0; vu=1; end
% построение матрицы переходных вероятностей
M=zeros(N,N);
for j=2:N; M(j-1,j)=dy+abs(vtr)*vu; end;
for i=1:n;
    for j=2:N; if j==1+m*i; M(j-1,j)=0; end;
    end;
end
for j=1:N-1; M(j+1,j)=dy+abs(vtr)*vd; end;
for i=1:n;
for j=2:N-1;
if j==m*i; M(j+1,j)=0; end;
end;
end
for j=m+1:N;
M(j-m,j)=dx;
end;
for i=1:n-1; for j=1:m; M(j+m+m*(i-1),j+m*(i-1))=v(j)+dx; end; end
for j=1:N; M(j,j)=1-sum(M(:,j)); end

S0=zeros(m,n)
for j=1:m;
    S0(m,1)=[1]; % начальный вектор состояния
end
for j=1:n;
    for i=1:m;
        s0(m*(j-1)+i,1)=S0(i,j);
    end;
end;
S(:,1)=s0;

```

```
k=220; %число переходов
for i=1:k
    S(:,i+1)=M*S(:,i); %текущий вектор состояния
end
```



ООО «РИМ»
 153000, г. Иваново, ул. Большая Воробьевская, д.26, пом/ком 1001/8
 ИНН/КПП 3702002131/370201001
 ОГРН 1153702001034
 Тел: (964) 647 40 00
 Web: <http://daco.ru/>

УТВЕРЖДАЮ:
 Зам.Ген.директора

ООО «РИМ»




Перов А.Б

11 2020 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ


Мы, нижеподписавшиеся, от ООО «РИМ» начальник производства Худяков А.Н., главный технолог Елкин Е.Н, от ИВГПУ д.т.н., профессор Огурцов В.А., аспирант Фатахетдинов А.М., составили настоящий акт о том, что разработанные в ИВГПУ предложения рекомендовать установку вибрационного смесителя на линии производства суперконцентратов ГКТУ- 4000 и ГКТУ- 5000. Годовая ожидаемая прибыль при запланированной годовой загрузке смесителя составит более 200 тысяч рублей.


От ООО «РИМ»

Начальник производства  Худяков А.Н.

Главный технолог  Елкин Е.Н

От ИВГПУ

Д.т.н., проф.  Огурцов В.А.

Асп.  Фатахетдинов А.М.