

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Ярославский государственный технический университет»

На правах рукописи



**Смирнов Павел Михайлович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ  
СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В БАРАБАННО – ВИНТОВОМ  
СТУПЕНЧАТОМ АППАРАТЕ**

Специальность: 2.6.13. – Процессы и аппараты химических технологий

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Таршис Михаил Юльевич,  
доктор технических наук, доцент

Ярославль – 2025

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. КОНСТРУКЦИИ СМЕСИТЕЛЕЙ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ГРАВИТАЦИОННО-ПЕРЕСЫПНОГО ДЕЙСТВИЯ И МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СМЕШИВАНИЯ....	9
1.1 Аппараты для смешивания сыпучих материалов гравитационно-пересыпного действия.....	9
1.2 Процесс смешивания сыпучих материалов и его математическое описание	23
1.2.1 Смешивание сыпучих материалов и критерии оценки однородности смеси .....	23
1.2.2 Математическое моделирование процесса смешивания сыпучих материалов. Виды математических моделей .....	25
1.3 Выводы по главе 1.....	33
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В СТУПЕНЧАТОМ БАРАБАННО- ВИНТОВОМ СМЕСИТЕЛЕ.....	34
2.1 Разработка принципиальной схемы смесителя для приготовления смесей с малыми концентрацией целевого компонента.....	34
2.2 Экспериментальные исследования нового смесителя сыпучих материалов.	37
2.2.1 Постановка задач исследования. Разработка лабораторной установки..	37
2.2.2 Разработка методики проведения исследований и способа определения качества смеси в барабанно-винтовом смесителе .....	38
2.2.3 Исследование влияния параметров смесителя на качество получаемой смеси .....	45
2.2.4 Результаты экспериментальных исследований ступенчатого барабанно- винтового смесителя .....	46
2.2.5 Исследование влияния конструктивных параметров барабанно- винтового смесителя на качество получаемой смеси .....	53
Выводы по главе 2.....	55
ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В БАРАБАННО-ВИНТОВОМ СМЕСИТЕЛЕ .....	57
3.1 Математическое моделирование процесса смешивания .....	58

3.2 Численное моделирование и сравнение результатов расчетов с данными эксперимента .....	67
3.3 Выводы по главе.....	72
<b>ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА БАРАБАННО-ВИНТОВОГО СТУПЕНЧАТОГО СМЕСИТЕЛЯ. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.....</b>	<b>73</b>
4.1 Расчет производительности смесителя и его основных конструктивных параметров .....	74
4.2 Применение ступенчатого барабанно-винтового смесителя в агрегате десульфуризации дымовых газов .....	81
4.3 Выводы по главе 4.....	86
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>87</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>88</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>107</b>
Приложение А Патент РФ № 2812190 .....	108
Приложение Б Патент РФ №2819489.....	109
Приложение В Программа для расчета.....	109
Приложение Г Справка с АО Кондор-Эко .....	109

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Смешивание сыпучих материалов является одним из наиболее распространенных механических процессов, широко применяемых в различных отраслях химической технологии, строительстве, металлургии, топливно-энергетического комплекса и многих других. На практике часто бывают востребованы смеси с небольшими (порядка 0,1) концентрациями ключевого компонента, обеспечение однородности которых является не простой технической задачей. Процесс приготовления однородных по составу сыпучих смесей также осложняется сопутствующим процессом сегрегации компонентов, который обусловлен различиями физико-механических свойств смешиваемых частиц (размеров, плотностей, формы и других). Поэтому создание эффективных конструкций аппаратов для приготовления однородных сыпучих смесей с малыми (порядка 0,1) концентрациями целевого компонента является актуальной задачей. Решение этой задачи может быть связано с разработкой аппаратов барабанного типа непрерывного действия. Устройства этого типа широко распространены в производстве благодаря простоте конструкции и низкой энергоемкости.

Научные работы по изучению этой тематике ведутся отечественными и зарубежными исследователями. Следует отметить труды многих ученых: Зайцев А.И., Першин В.Ф., Лебедев А.Е., Макаров Ю.И., Жуков А.Н., Капранова А.Б., Мудров А.П., Пикмуллин Г.В., Lommen S., Mohajeri M., Lodewijks G. и др.

Настоящая работа выполнялась в ФГБОУ ВО «ЯГТУ» в соответствии с приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники в РФ: Указом Президента Российской Федерации от 18.06.2024 г. № 529 об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий (в том числе, технологий предупреждения и снижения рисков чрезвычайных ситуаций техногенного характера, негативных социально-экономических последствий); в соответствии с планами госбюджетных работ НИР в ФГБОУ ВО «ЯГТУ» (2021 – 2025гг.).

Объект исследования – процесс смешивания сыпучих материалов в аппаратах гравитационно-пересыпного действия.

Предмет исследования: механизм смесеобразования, поведения критерия однородности сыпучей смеси в барабанно – винтовом ступенчатом аппарате.

Цель работы. Разработка инженерного метода расчета барабанно- винтового смесителя непрерывного действия, обеспечивающего получение качественных сыпучих смесей компонентов в соотношении 1:1–1:11 на основе экспериментальных и теоретических исследований процесса смешивания.

Реализация цели предполагает решение следующих задач исследования:

1. Разработка эффективного экспериментального метода исследования качества смеси в её сечениях на ступенях смесителя.

2. Проведение экспериментальных исследований барабанно-винтового ступенчатого смесителя с целью установления влияния его конструктивных, режимных параметров, свойств компонентов на качество сыпучих смесей.

3. Проведение теоретических исследований механики движения сыпучего материала в рабочем объеме аппарата и разработка математической модели процесса смешивания, позволяющей определить поле скоростей и концентраций частиц компонентов в рабочем объеме аппарата; получить значения коэффициента неоднородности в поперечных сечениях смесителя.

4. Разработка метода инженерного расчета основных параметров ступенчатого барабанно-винтового смесителя сыпучих материалов, отличающихся отношением объёмов компонентов в пределах от 1:1 до 1:10.

Направления исследования отвечают паспорту специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий. Работа выполнена в соответствии со следующими пунктами.

1. Фундаментальные исследования явлений переноса энергии, массы и импульса в химико-технологических процессах и аппаратах.

3. Способы, приемы, методология исследования, перемещение сыпучих материалов в технологических аппаратах и схемах.

6. Способы, приемы, методология исследования механических процессов, совершенствование их аппаратного оформления.

Научная новизна работы:

1. Разработана математическая модель процесса смешивания сыпучего материала в новом барабанно-винтовом ступенчатом аппарате, позволившая определить поле скоростей и концентраций частиц и получить зависимости коэффициента неоднородности смеси в произвольном его сечении.

2. По результатам экспериментальных исследований нового аппарата получены уравнения регрессии, связывающие коэффициент неоднородности смеси с его параметрами (числом ступеней, их длинами, шагом и высотой винтового желоба, концентрацией ключевого компонента).

3. Теоретически обоснована методика инженерного расчета конструктивных и режимных параметров нового смесителя в части определения критерия качества смеси.

Теоретическая значимость состоит в том, что разработанная математическая модель, позволяет прогнозировать состояние однородности смеси в различных сечениях барабанно-винтового смесителя и может быть использована при создании обоснованных методов расчета новых устройств.

Практическая ценность результата:

1. Разработан новый барабанно-винтовой ступенчатый смеситель (Приложение А), для приготовления однородных смесей с соотношением компонентов 1:1-1:11.

2. Разработан эффективный способ экспериментального исследования процесса смешивания в устройстве непрерывного действия, с дополнительными рабочими элементами (Приложение Б).

3. Разработан алгоритм численного расчета процесса смешивания в новом аппарате по предложенной математической модели. Метод инженерного расчета нового смесителя сыпучих материалов непрерывного действия может быть востребован проектными организациями для разработки оборудования непрерывного действия в различных отраслях промышленности.

4. Использование новой конструкции смесителя предлагается в агрегате для десульфуризации дымовых газов.

Положения, выносимые на защиту:

- конструкция ступенчатого барабанно-винтового смесителя сыпучих материалов;
- способ исследования качества сыпучей смеси в барабанно-винтовом смесителе непрерывного действия с дополнительными рабочими органами;
- математическая модель процесса смешивания в барабанно-винтовом аппарате, которая учитывает сегрегацию и дозагрузку компонентов на ступени;
- результаты экспериментальных исследований, которые устанавливают влияние основных параметров смесителя, процесса и сыпучих материалов на качество получаемых смесей;
- программы расчета процесса смешивания компонентов, вычисления коэффициента неоднородности смеси в барабанно-винтовом аппарате, разработанные на основе предложенной математической модели;
- инженерная методика расчета конструктивных, технологических и энергетических параметров нового барабанно-винтового ступенчатого смесителя сыпучих материалов.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов обоснована применением надежных методов проведения экспериментальных исследований, современных компьютерных методов обработки результатов, а также корректностью моделирования процесса смешивания на основе известных законов механики движения и взаимодействия частиц.

Личный вклад автора. Диссертантом выполнен весь объем экспериментальной работы, проведена обработка результатов, их анализ. Автор принимал участие в подготовке публикаций, разработке нового аппарата и способа его исследования, разработке математической модели процесса смешивания и компьютерных программ для её реализации.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на международных научных конференциях

«Математические методы в технике и технологиях»: ММТТ-36 (Н. Новгород, НГТУ, 2023г.); ММТТ-37 (Казань, КНИТУ, 2024г.); ММТТ-38 (Гродно, 2025г.); XII Международном Беремжановском съезде по химии и химической технологии, 4-6 декабря, 2024, Алматы, Казахстан; 75-78 всероссийских научно-технических конференциях студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием (Ярославль 2022–2025гг.).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 23 научных работах, в том числе в 6 статьях в журналах из перечня рекомендованного ВАК РФ, 2 патентах на изобретение РФ и в 15 тезисах докладов на научных конференциях, в том числе 7 международных.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, приложений. Работа изложена на 124 страницах и содержит 36 рисунков и 1 таблицу.

# ГЛАВА 1. КОНСТРУКЦИИ СМЕСИТЕЛЕЙ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ГРАВИТАЦИОННО-ПЕРЕСЫПНОГО ДЕЙСТВИЯ И МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СМЕШИВАНИЯ

## 1.1 Аппараты для смешивания сыпучих материалов гравитационно-пересыпного действия

Смесители сыпучих материалов широко применяются как в химической промышленности, так и во многих других отраслях производства. Они широко используются в энергетике, сельском хозяйстве, угольной промышленности, строительном производстве и других.

Многообразие конструкций аппаратов гравитационно-пересыпного действия для смешивания сыпучих материалов достаточно велико. Для их сопоставления и оценки эффективности применения в конкретных условиях необходимо использовать определенную классификацию. При анализе конструкций смесителей авторы используют различные классификации [1-3]. Здесь будем использовать классификацию преимущественно по конструктивным признакам, методу силового воздействия на смесь и по временному характеру работы (смесители периодического и непрерывного действия).

Сначала кратко рассмотрим смесители периодического действия без дополнительных перемешивающих устройств.

Смеситель периодического действия – это аппарат, в котором смешивание ингредиентов осуществляется в отдельном рабочем объеме порциями. При этом технология предполагает следующие этапы:

- дозирование каждого компонента;
- загрузка компонентов в рабочую камеру;
- смешивание компонентов внутри рабочей камеры;
- выгрузка смеси.

К преимуществам смесителей периодического действия относят: гибкость производства, возможность проследить партию, простоту контроля партии (за изменением её однородности с течением времени), относительно небольшие

затраты при порционном смешивании на установку и эксплуатацию, легкость очистки оборудования.

Наиболее распространенными в производстве в настоящее время являются барабанные смесители. Эти аппараты относятся к тихоходным устройствам и обладают низкой энергоемкостью, просты по конструкции, не сложны в обслуживании и эксплуатации, имеют высокие показатели надежности.

Типы барабанных смесителей без дополнительных перемешивающих устройств [1] показаны на рисунке 1.1. Отсутствие дополнительных рабочих органов в этих аппаратах позволяет широко применять барабанные смесители при смешивании взрывоопасных материалов и материалов с высокой абразивностью. Среди них, наряду гладким цилиндрическим барабаном (рисунок 1.2 а, б) используются и барабаны, имеющие и другую форму: биконическую (в, г), граненую (д), цилиндрическую (б, и, е), кубическую (ж), тетраэдрическую (з). Корпус барабанного смесителя типа «пьяная бочка» (и) имеет ось, наклоненную относительно оси вращения барабана.

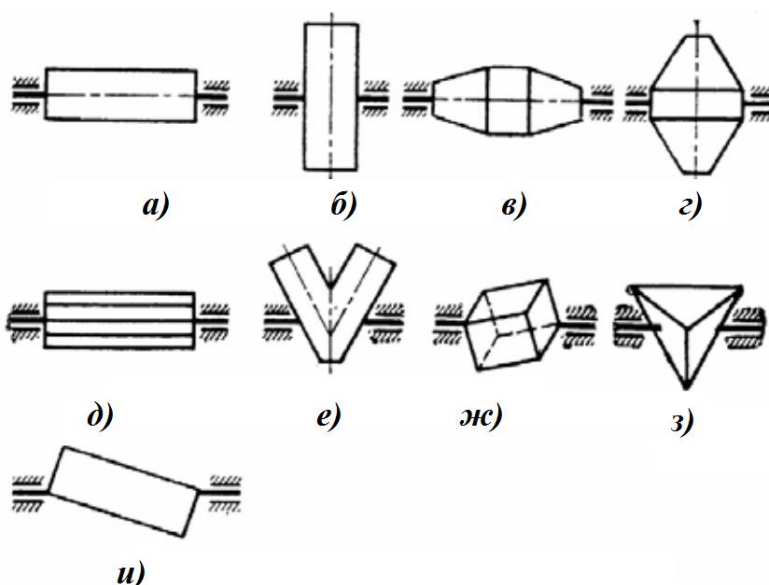


Рисунок 1.1 – Различные конструкции корпуса барабана смесителей периодического действия

Наиболее простой конструкцией смесителя гравитационно-пересыпного действия является барабанный аппарат с гладким корпусом, то есть без

дополнительных перемешивающих устройств [1, 2]. Он может быть использован как аппарат периодического, либо непрерывного действия. Такой аппарат (непрерывного действия) показан на рисунке 1.2. Он содержит корпус (барабан) 1 с банджами 2, разгрузочную камеру 4, опорные станции 5, 6, электродвигатель 7, редуктор 8, станину 9, патрубок загрузки 10. Барабан приводится во вращение электродвигателем 7 через редуктор 8, вал которого связан с роликами опорных станций 5, 6.

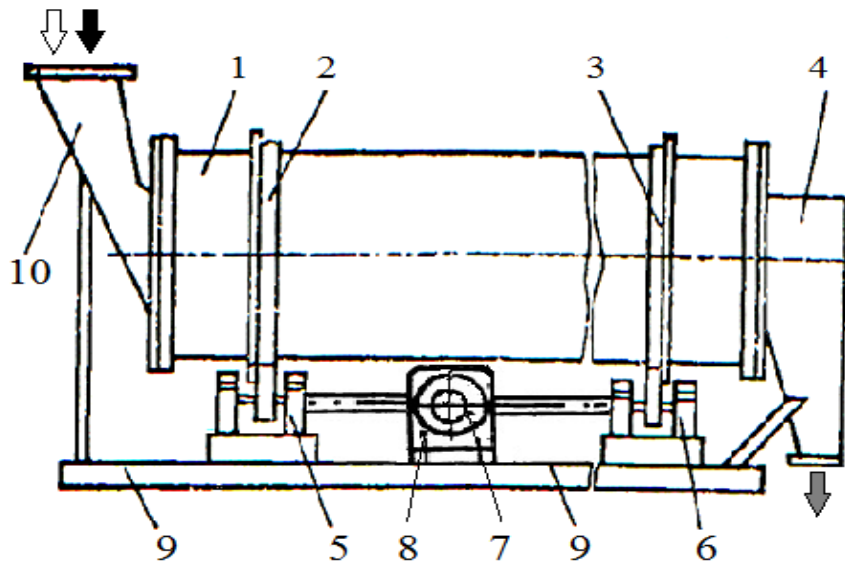


Рисунок 1.2 – Смеситель с гладким цилиндрическим корпусом

Материал подается в смеситель через патрубок 10, удаляется – из разгрузочной камеры 4. Материал, поступающий во вращающийся барабан, движется в режиме переката. Т.е. поднимается в направлении вращения барабана на определенную высоту под действием сил трения. По достижении свободной поверхности сыпучей смеси некоторого угла наклона (угла обрушения), материал обрушивается. Таким образом, возникает циркуляция смеси в поперечном сечении барабана. В слоях, прилегающих к рабочей поверхности барабана, траектории частиц подобны этой поверхности, а в области обрушения, их траектории пересекаются, что приводит к активному смешиванию компонентов. Однако если свойства смешиваемых компонентов различаются по физико-механическим свойствам, наряду со смешиванием присутствует и их «сегрегация». Механизм

сегрегации описан во многих работах [1, 2, 4, 7, 8]. Этот механизм схематично показан на рисунке 1.3, а). Он состоит в просачивании более мелких частиц (В, С) через «решётку» частиц более крупных (А). Более плотные частицы также выдавливают менее плотные частицы. Таким образом, мелкие и плотные частицы (С) локализуются в центре циркуляции смеси, образуя ядро сегрегации. Таким образом, сегрегация частиц также как и их смешивание происходит преимущественно в области обрушения.

К наиболее известным методам борьбы с такой сегрегацией относится применение рабочих лопастей, проходящих через центр сегрегации при работе смесителя. В этих целях используются лопасти различных типов. Два типа лопастей показаны на рисунке 1.3, б, в).

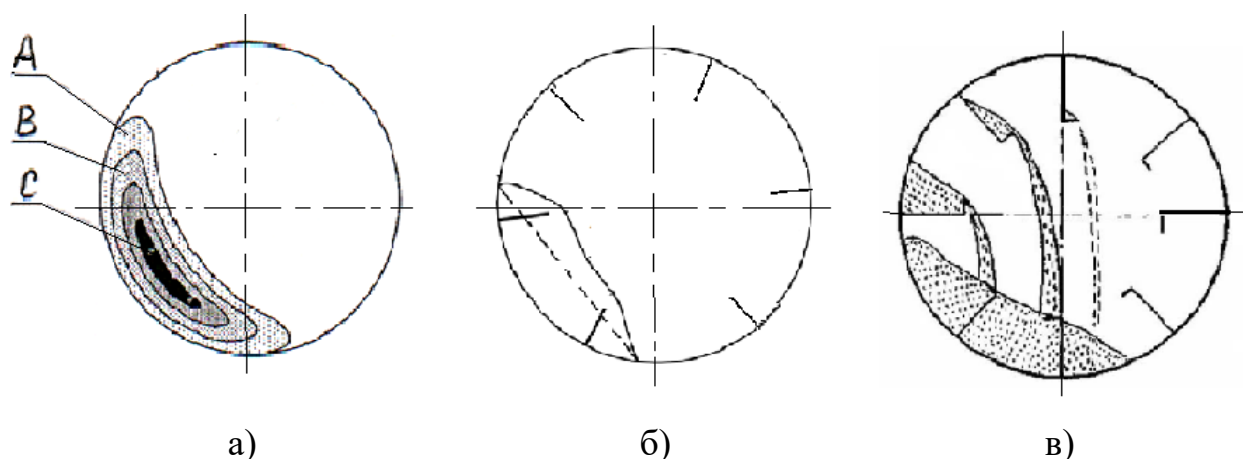


Рисунок 1.3 – Сегрегация компонентов смеси в барабанном смесителе с гладким корпусом (а) и методы разрушения ядра сегрегации смеси: с помощью прямых (б) и Г-образных (в) лопастей

Лопастей, преимущественно наклонные, также обеспечивают повышение сглаживающей способности смесителя за счет организации продольного движения материала.

Анализ конструкций аппаратов, проведенный в работах [1, 2, 4, 7, 8] позволил классифицировать некоторые методы повышения качества приготовляемых составов следующим образом:

- установка подвижных и неподвижных перемешивающих устройств, проходящих через центр сегрегации и разрушающих его при работе смесителя;
- применение устройств распределенной подачи компонентов в поток обрушения, вдоль оси корпуса смесителя, кольцевыми слоями;
- организация нестационарного движения частиц компонентов за счет изменяющейся формы рабочих поверхности корпуса смесителя, использования рабочей камеры сложной формы и деформируемой рабочей камеры;
- организация нестационарного движения смеси за счет обеспечения движения корпуса смесителя по определенному закону.

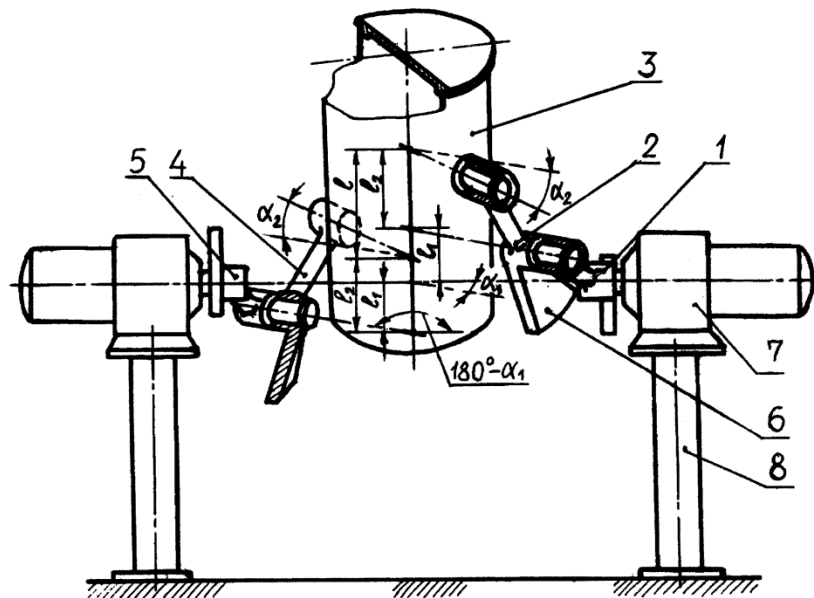


Рисунок 1.4 – Смеситель сыпучих материалов с регулированием закона движения барабана

Смеситель [9], в котором проблема борьбы с сегрегацией решается за счет организации переменного закона движения корпуса, представлен на рисунке 1.4. Он состоит из барабана 3, шарнирно связанного промежуточными 2, 4 и опорными 1, 5 кривошипами со станиной 8, выполненной в виде двух мотор-редукторов 7, валы которых соосны. Каждый кривошип имеет противовес 6 для уравнивания масс барабана. Движение от мотор-редуктора передается опорному кривошипу 1 или 5. В случае если работает один мотор-редуктор, а

второй с закрепленным на его валу кривошипом заторможен, то движение от опорного кривошипа через первый промежуточный кривошип и барабан передается второму промежуточному кривошипу, ось вращения которого неподвижна. Если же работают оба мотор-редуктора, то движение передается через опорные 1, 5 и промежуточные 2, 4 кривошипы барабану 3.

К недостаткам смесителя относится сложность конструкции, связанная с наличием двух приводов. Этим же обстоятельством обусловлена его высокая металлоемкость. Смеситель также требует дополнительного уравнивания.

Барабанный смеситель [10] с дополнительными рабочими элементами и рабочим корпусом сложной формы представлен на рисунке 1.5. Он содержит станину 1, электродвигатель 2, редуктор 3 и четыре роликовых опоры 4. Корпус 5 снабжен двумя ободьями 6, которые опираются на роликовые опоры 4. На станине смонтированы устройства загрузки 7 и разгрузки 8. Смеситель снабжен трубопроводом 9 для подачи внутрь корпуса 5 воды.

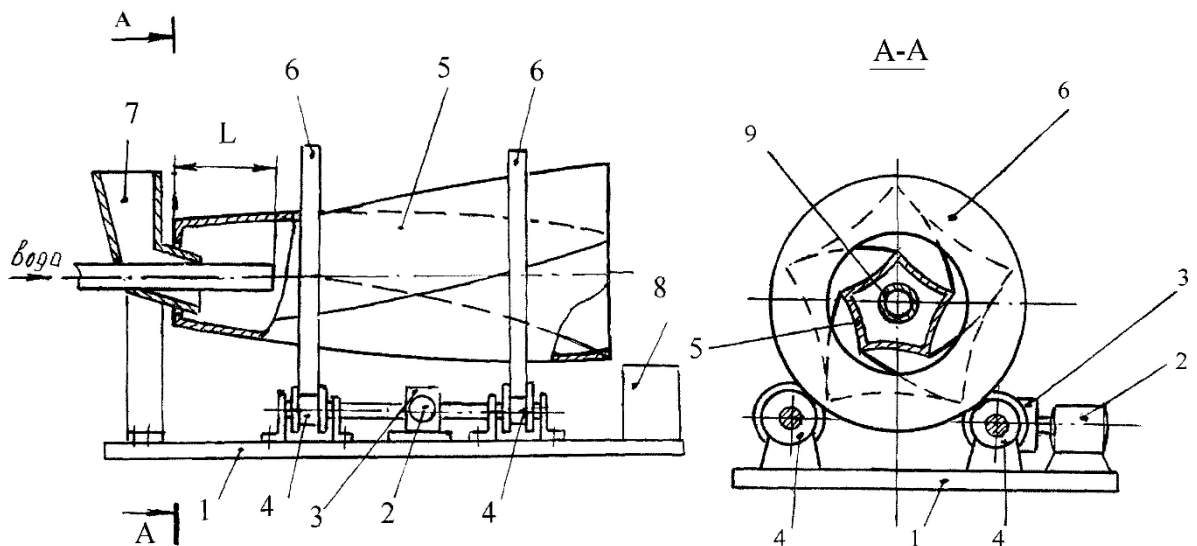


Рисунок 1.5 – Смеситель с дополнительными рабочими элементами

В корпус 5 непрерывно загружают компоненты, а через входной патрубок 7, одновременно подается вода. Частицы материала захватываются внутренней

винтовой поверхностью и направляются в зону выгрузки 8, совершая при этом сложное движение. На выходе из смесителя получают готовую смесь.

Среди недостатков данного смесителя можно отметить также сложность конструкции, высокую металлоемкость и энергоемкость, сложность изготовления и очистки рабочих поверхностей. Невысокая сглаживающая способность этого устройства из-за отсутствия обратного осевого движения материала также является его недостатком.

Смеситель [11], показанный на рисунке 1.6, содержит раму 1 и установленную на ней горизонтальную емкость, образованную укрепленными на горизонтальном валу 2 дисками 3, 4 и охватывающей их бесконечной лентой 5, патрубки подачи компонентов 6 и выгрузки смеси 7. Лента огибает натяжные ролики 8, 9 и приводной ролик 10. Внутри емкости размещены горизонтальные шнеки 11, валы которых установлены на дисках 3, 4 в подшипниках 12. На валах шнеков жестко установлены шестерни 13, находящиеся в зацеплении с неподвижным зубчатым колесом 14, размещенным свободно на валу 2 и закрепленным на раме 1. Таким образом, шестерни 13 (сателлиты) с неподвижным зубчатым колесом 14 образуют планетарную передачу. Привод содержит двигатель 15, редуктор 16 и соединен с роликом 10. Компоненты через патрубок 6 загружаются в цилиндрическую емкость, образованную дисками 3, 4 и лентой 5. При работе привода лента 5 приходит в движение. Компоненты, находящиеся в рабочей емкости, поднимаются вверх и обрушиваются, достигнув некоторого уровня. Перемешивание компонентов происходит преимущественно в потоке обрушения материала. Вращающиеся шнеки, проходя через центр циркуляции смеси, «выдавливают» локализующиеся здесь в результате сегрегации частицы в область активного смешивания. При поочередном прохождении через смесь шнеков со спиралями противоположного направления, происходит дополнительная циркуляция и перемешивание смеси в осевом направлении. Готовая смесь выгружается из емкости через патрубок 7 при реверсе привода.

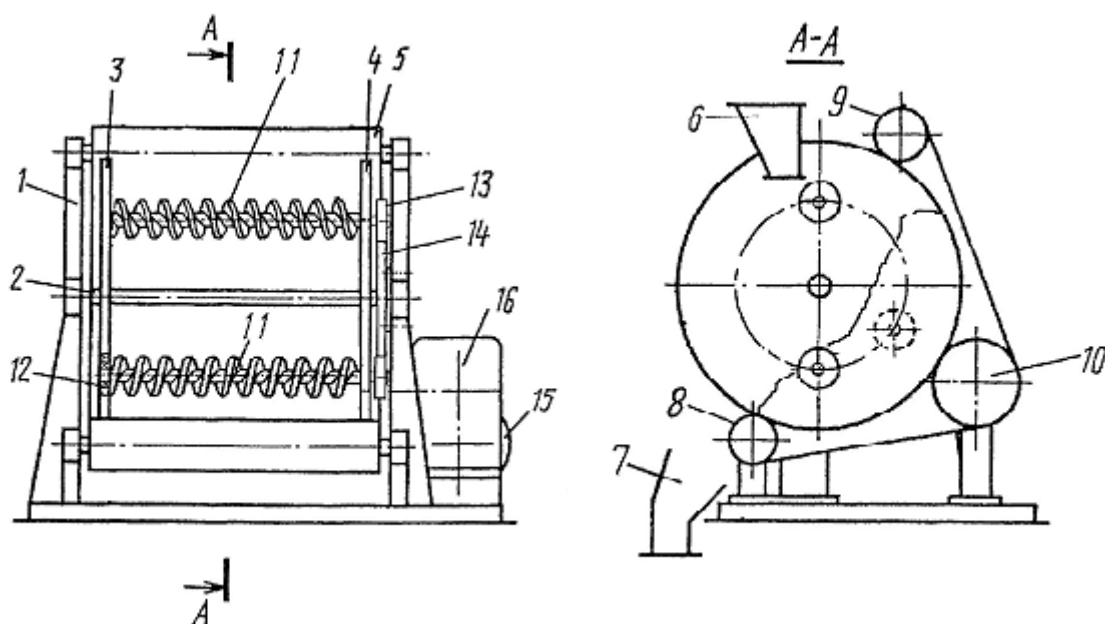


Рисунок 1.6 – Смеситель сыпучих материалов с бесконечной гибкой лентой

К недостаткам данного смесителя следует отнести его невысокую надежность из-за возможности нарушения контакта между бесконечной лентой 5 и дисками 3, 4 при попадании частиц материала. Кроме того рабочие шнеки являются весьма дорогостоящими и металлоемкими изделиями. Следует отметить, что смесители открытого типа [10-14], к которым относится рассмотренный аппарат, обладают тем преимуществом, что позволяют организовать подачу ключевого компонента непосредственно в поток обрушения и обеспечить быстрое приготовление смеси способом [4]. Однако, эффективность такого способа зависит от точности дозирования ключевого компонента в поверхностный поток.

Барабанный смеситель [15] с лифтёрами, представленный на рисунке 1.7 предполагает дополнительное воздействие на смесь, сходящую с лифтёров (ступенчатое). Смеситель содержит: барабан 1, лифтёры 2, приводные ролики 3, станина 4, загрузочное устройство 5, разгрузочное устройство 6, штангу 7, блок 8 смесительных элементов 9.

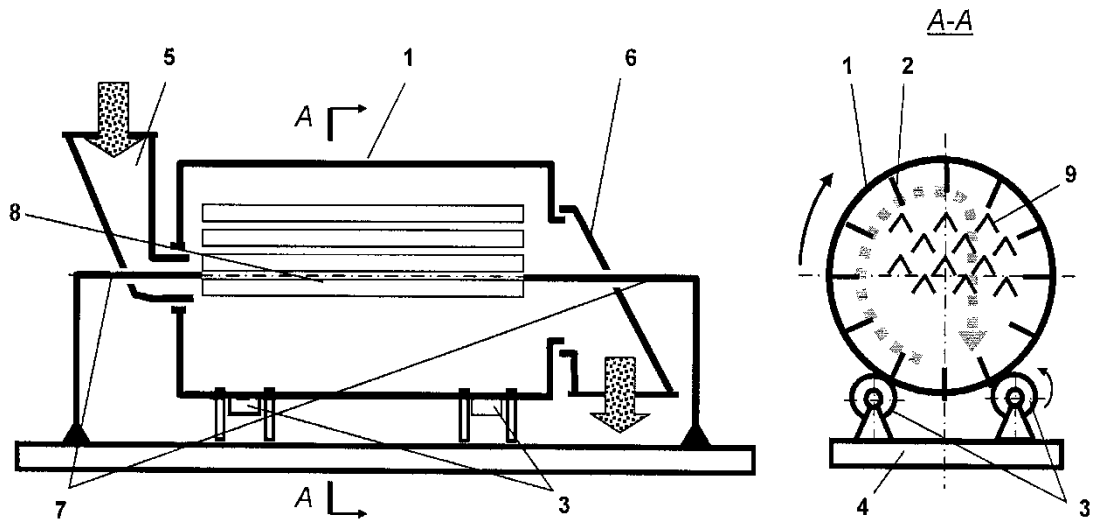


Рисунок 1.7 – Барабанный смеситель сыпучих материалов с лифтьерами

Смешиваемые компоненты попадают в барабан через загрузочное устройство 5, затем смесь поднимается вместе с внутренней поверхностью барабана, а потом опускается вниз, в результате компоненты смеси перемешиваются, так же происходит движение вдоль оси барабана, полученную смесь удаляют из аппарата.

Главной особенностью данного смесителя является наличие дополнительного блока 8 смесительных элементов 9. Их устанавливают с зазором к лифтерам в верхней половине барабана на штанге 7, жестко связанной со станиной 4. Смесительные элементы выполнены из равнополочного уголка с углом от 60 до 90 градусов, и установлены в шахматном порядке углом вверх. Такой блок смесительных элементов не задерживает компоненты, что исключает забивание блока материалом.

При работе смесителя исходные компоненты смеси загружаются во вращающийся смесительный барабан 1 через загрузочное устройство 5. Затем компоненты смеси поднимаются подъемниками 2 и высыпаются из них вниз, попадая в блок 8 перемешивающих элементов 9, благодаря которому компоненты смеси подвергаются интенсивному поперечному перемешиванию. Полученная смесь выгружается через разгрузочное устройство 6.

Повышение однородности смеси при перераспределении компонентов в блоке перемешивающих элементов 9, может не компенсировать сегрегационные процессы на этих же элементах при переработке смесей, компонентов, отличающихся по своим свойствам (например, по плотности, форме и других). Кроме того, данная конструкция смесителя является достаточно металлоемкой.

На рисунке 1.8 представлен ещё один вариант ступенчатого исполнения смесителя сыпучих материалов с барабанами, образованными бесконечной гибкой лентой [16]. Устройство для смешения сыпучих материалов состоит из устройств загрузки смешиваемых компонентов 1 и 2, рамы 3, на которой установлены горизонтальные емкости, образованные закрепленными на валах звездочками 7, 8, 9, 10 и охватывающей их бесконечной лентой 4. На обеих поверхностях бесконечной ленты установлены спиральные направляющие 5 и 6, направление витков которых противоположное. В боковых частях бесконечной ленты установлены тяговые цепи 18 и 19.

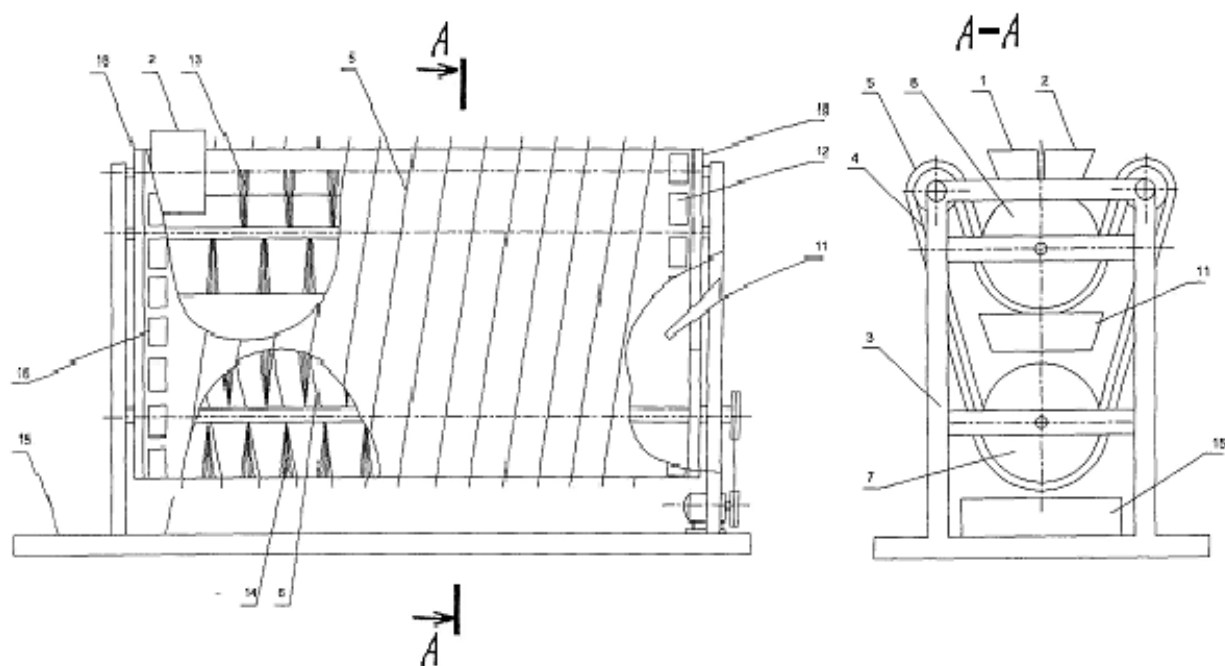


Рисунок 1.8 – Устройство для смешивания сыпучих материалов

Перемешивающие устройства крепятся к валам и представляют собой спирали, витки которых выполнены в виде эластичных элементов 13 и 14. Для перемещения смеси из верхней части в нижнюю на ленте прорезаны окна 12, и

установлен лоток 11. Привод ленты и перемешивающих валов устройств осуществляется от электродвигателя 17. Приготовленная смесь высыпается в устройство выгрузки 15 через разгрузочные окна 16.

Сыпучие материалы подаются из устройств загрузки в верхнюю горизонтальную емкость и, при движении ленты перемещаются в осевом направлении по виткам спиральных направляющих. При этом происходит их непрерывное смешивание. При достижении смеси конца верхнего барабана она обрушается через пересыпные окна в нижнюю часть емкости. При движении смеси в нижнем барабане происходит аналогичное движение смеси, но в противоположную сторону. Выгрузка смеси осуществляется через разгрузочные окна в устройстве выгрузки.

Данный смеситель имеет ступенчатую конструкцию, которая определяет его вышеупомянутые преимущества. Однако ступенчатость достигнута за счет увеличения числа перегибов ленты с большими углами охвата валов, что приводит к снижению надежности смесителя и существенному росту силы натяжения в ветвях ленты, что также определяет и рост энергоемкости устройства.

Известны смесители, в которых в качестве корпуса последовательно (ступенчато) устанавливаются сообщающиеся эластичные камеры – покрышки [17, 18]. На рисунке 1.9 показан общий вид барабанного двухступенчатого смесителя. Он состоит из двух горизонтально расположенных камер 1 и 2 связанных между собой, размещенных в горизонтальной трубе 3. Лопастей 6, механизм регулировки лопастей вал 7, крышки 4, 5, маховик 9, стержни 10, уголки 11, 12 патрубков для загрузки компонентов, 13 конус, 14 патрубков выгрузки смеси, приемный бункер 15, 16 ролики. Смеситель работает следующим образом. Исходные компоненты засыпают внутрь первой камеры смесителя, затем посредством вращения барабана происходит перекачивание смеси, а также за счет лопастей 6 происходит сложное движение частиц смеси. В процессе сложного движения смесь постепенно попадает во вторую камеру, впоследствии готовую смесь удаляют из аппарата. Для обеспечения эффективности проектируемого технического

Основные преимущества данного аппарата состоят в том, что обеспечивается циркуляция сыпучего материала не только в поперечном сечении смесителя, но и в его продольном сечении.

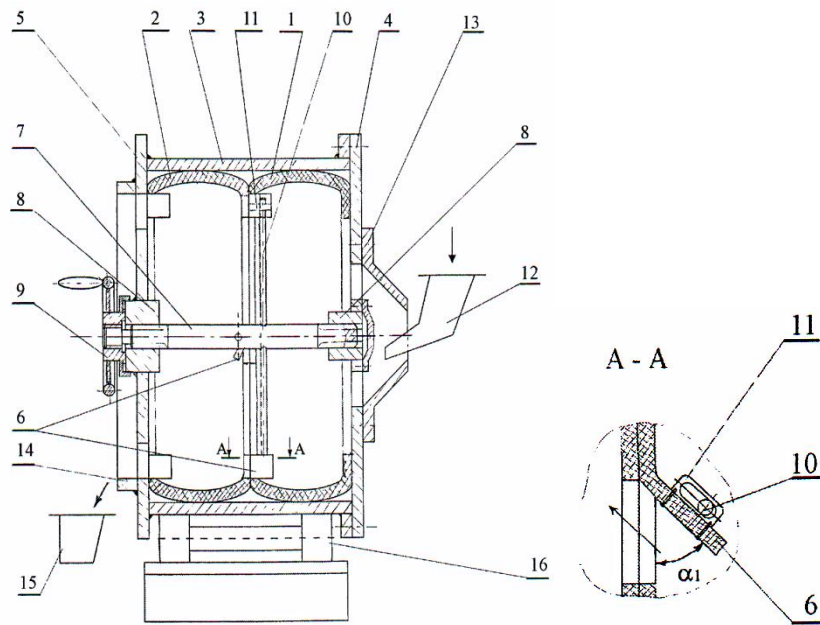


Рисунок 1.9 – Схема двухкамерного барабанно-лопастного смесителя сыпучих материалов

В устройстве возможно решение ряда задач, среди которых – выбор рациональных параметров процесса и устройства, продление его срока службы (ресурса), обеспечение повторного использования отработавших ресурс технических узлов, изделий. Тем не менее, сложность конструкции механизма регулировки наклона лопастей существенно снижает надежность смесителя.

На рисунке 1.10 показано устройство для смешивания и обработки материалов [19]. Это барабанный смеситель, в котором шнек 1 имеет спиральную лопасть, наружный край которой закреплен к внутренней поверхности барабана.

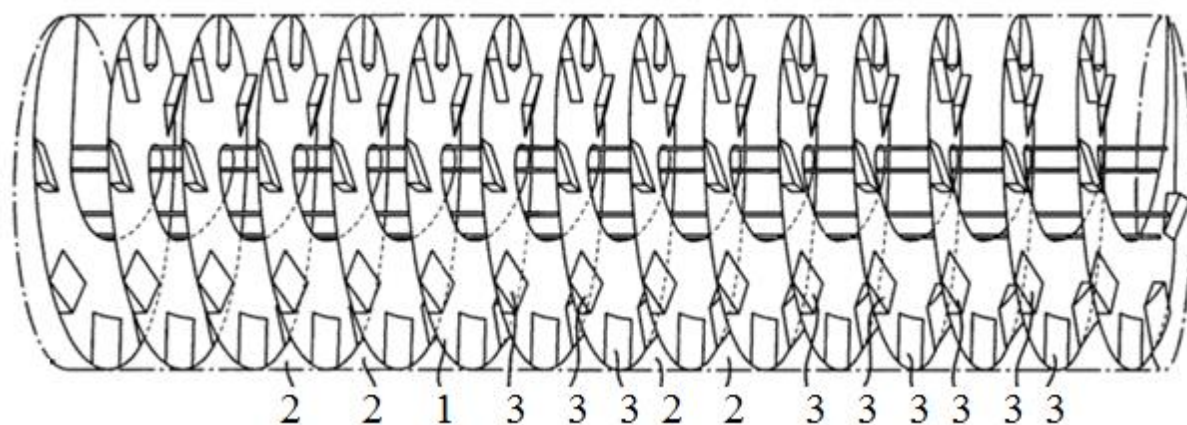


Рисунок 1.10 – Барабан со спиральной лопастью, оснащенной дополнительными смесительными устройствами

Такая конструкция позволяет обеспечивать смешение в отдельных объемах 2 каждого витка шнека. Для повышения качества смешения каждый виток спиральной лопасти оснащен дополнительными смешивающими устройствами 3.

Тем не менее, следует отметить сложность конструкции, сложность очистки рабочих поверхностей, её высокую металлоемкость и сложность изготовления.

Барабанный смеситель [20], показанный на рисунке 1.11 включает: смесительный барабан 1, внутри которого установлена цилиндрическая вставка со спиральным вырезом 2 с разделителями 3, загрузочное 4 и разгрузочное 5 устройства, основание 6. Сыпучий материал через загрузочное устройство 4, попадает в цилиндрическую вставку, разделяется на потоки и через спиральные вырезы 2 поступает в барабан 1. Потоки материала попадают на разделители 3. Первая часть потока поднимается, а вторая - сбрасывается на вставку и на внутреннюю поверхность барабана между разделителями, где смешивается и пересекается с новым материалом, поступающим через загрузочный патрубок. Другая часть потока попадает обратно вовнутрь цилиндрической вставки через спиральные вырезы. Смесь выгружается через устройство 5.

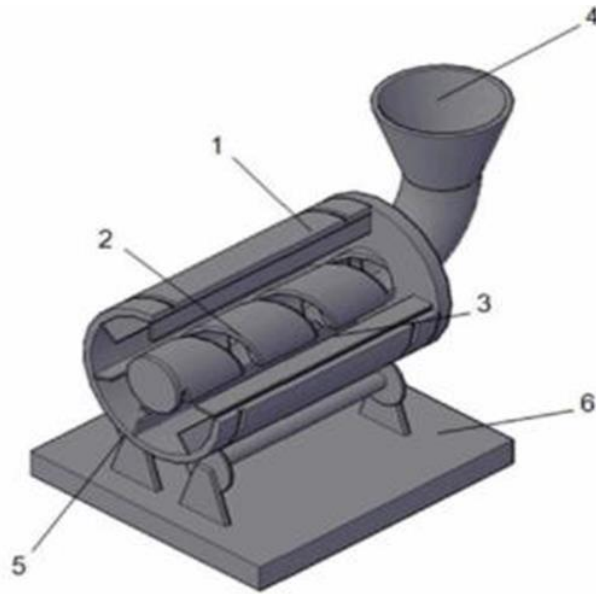


Рисунок 1.11 – Барабанный смеситель с цилиндрической вставкой

Недостатки данного смесителя состоят в его высокой материалоемкости, сложности изготовления, вероятность зарастания прорези вставки материалом смеси и сложность её очистки.

По результатам данного анализа конструкций смесителей гравитационно-пересыпного действия, основные методы снижения сегрегации сыпучих компонентов, перечисленные на странице 13, могут быть дополнены следующими:

- организация сложного движения рабочей камеры смесителя, с переменным законом [9];
- ступенчатая конструкция смесителя, позволяющая переработку компонентов с использованием метода разбавления;
- применение в конструкции смесителя разделяющих и возвращающих устройств, позволяющих повысить кратность циркуляции перерабатываемых компонентов [20, 21].

## 1.2 Процесс смешивания сыпучих материалов и его математическое описание

### 1.2.1 Смешивание сыпучих материалов и критерии оценки однородности смеси

Смешивание сыпучих материалов – это процесс образования однородных сыпучих систем из материалов, первоначально находящихся отдельно или в неоднородно внедрённом состоянии. Смесь сыпучих материалов, называется однородной, если в любой ее пробе соотношения частиц компонентов, содержащихся в смеси (а, следовательно, и концентрации каждого из компонентов) являются постоянными. Такая смесь является идеальной и в реальных условиях, получить её невозможно в силу процессов сегрегации (разделения) компонентов, сопутствующих процессу смешивания. Процессы сегрегации возникают из-за различия физико-механических свойств смешиваемых компонентов. Таким образом, качество конкретной смеси зависит от степени её приближения к идеальной смеси.

Оценку качества (однородности) смеси, как правило, проводят по распределению одного из компонентов в общей массе смеси. Этот компонент называется целевым или ключевым [1] Все остальные компоненты условно объединяют в один (транспортирующий или несущий) компонент. Существует значительное число критериев оценки качества смеси. В работе профессора Макарова Ю.И. [1] приведено около двадцати таких критериев. Наиболее часто применяемым является коэффициент неоднородности (вариации) [1, 3, 5, 22, 23].

В работе [23] критерии оценки качества смеси разделены на 3 основные группы:

1) критерии, основанные на оценке разброса концентраций ключевого компонента в пробах, которые отбираются по всему исследуемому объему смеси.

К ним, можно отнести коэффициент неоднородности, а также дисперсию  $D$  концентрации ключевого компонента:

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - c_0)^2, \quad (1.1)$$

где  $\bar{c}_0$  – средняя по объему смеси массовая или объемная концентрация ключевого компонента;

$c_i$  – концентрация ключевого компонента в  $i$ -ой пробе;

$n$  – количество проб.

2) критерии оценки качества, получаемые на основе анализа структуры смеси на уровне отдельных частиц смешиваемых фракций в микрообразцах, содержащих малое число частиц. Большинство из этих критериев основаны на вычислении усредненных, по исследуемым пробам, контактных и координационных чисел для частиц ключевого компонента [25-27].

Пример такого критерия - эффективное контактное число [25]:

$$C = \frac{1}{n(1 - \bar{c}_0)} \sum_{i=1}^n n_i^* \bar{c}_i (1 - \bar{c}_i), \quad (1.2)$$

где  $n_i^*$  – координационное число для выбранной частицы ключевого компонента в микропробе;

$\bar{c}_i$  – концентрация частиц неключевых компонентов в пробе;

$\bar{c}_0$  – усредненная по всем взятым пробам концентрация частиц неключевых компонентов;

$n$  – количество проб.

Критерии, основанные на оценке поверхности контакта смешиваемых фаз [1, 27-29] также относятся к этой группе и требуют рассмотрения смеси на малых масштабах, сравнимых с размерами отдельных частиц.

3) Интегральные критерии оценки однородности сыпучей смеси позволяют преодолеть односторонность известных «макро-» и «микро-» подходов к оценке качества смеси и учитывать информацию о распределении смешиваемых фракций в широком диапазоне масштабов [28, 30-33].

Можно отметить, что критерий качества является основной величиной, которая в большинстве исследований определяется и сопоставляется, делаются выводы об адекватности математической модели процессу.

## 1.2.2 Математическое моделирование процесса смешивания сыпучих материалов.

### Виды математических моделей

При моделировании процесса смешивания сыпучих материалов необходимо установить функциональную связь между свойствами смесительной системы и критерием оценки качества получаемой смеси. Под смесительной системой понимают совокупность устройства для смешивания и сыпучих компонентов, подлежащих переработке. К свойствам системы принято относить параметры устройства: конструктивные и режимные (производительность, скорости движения рабочих элементов смесителя, соотношение смешиваемых компонентов), а также физико-механические свойства перерабатываемых компонентов (средний диаметр частиц, их форма, плотности – физические и насыпные, углы естественного откоса материалов и другие).

Известные подходы к математическому описанию процесса смешивания сыпучих материалов можно разделить на те, которые учитывают физическую природу процесса и те, в которых смесительная система рассматривается как «черный ящик». Таким образом, известные математические модели можно оценить по степени удаленности подхода к моделированию смесительной системы посредством «черного ящика». Существует значительное число достаточно подробных обзоров и классификаций математических моделей процесса смешивания сыпучих материалов [6, 7, 34-40].

Будем рассматривать известные подходы к моделированию в соответствии со структурной схемой, показанной на рисунке 1.12.

Очевидно, что при описании процесса смешивания сыпучих материалов необходимо учитывать вероятностную природу этого процесса, то есть предпочтительными являются стохастические модели. Однако, детерминированные подходы к описанию процесса смешивания до сих пор также применяются.



Рисунок 1.12 – Основные подходы к моделированию процесса смешивания сыпучих материалов

К моделям первого типа (детерминированным) относят типовые модели структуры потока [1, 22, 41-43] (идеального вытеснения, идеального смешения, диффузионную, ячеечную и комбинированные). Движение материала без смешивания частиц описывает модель идеального вытеснения. Мгновенное распределение частиц по рабочему объему смесителя представляет модель идеального смешения. В реальных смесителях эти модели практически не используются, поскольку не встречается такое движение частиц. Ячеечная модель описывает перераспределение частиц при их движении в потоке материала через систему цепочек, составленных из ячеек идеального смешивания, образующих циркуляционный контур смесителя [43-51]. Подробно этот подход

рассматривается в работе [1].

Ячеечные модели, учитывающие вероятностный характер процесса смешивания в циркуляционных смесителях разрабатываются в работах [49, 51-53]. В работе [51] описано применение ячейной модели, учитывающей конвективные и диффузионные взаимодействия между ячейками. Для смесителей, имеющих выраженные застойные зоны и зоны циркуляции, используют комбинированные модели. Однако, при этом возникают трудности решения громоздких уравнений.

При использовании методов кибернетики [54-58] смеситель рассматривается как «чёрный ящик», в котором преобразуются входные сигналы  $x(t)$  в выходные  $y(t)$ , а функциональная связь между ними определяется уравнением:

$$L(y(t)) = L(x(t)) \cdot W(p), \quad (1.3)$$

где  $W(p)$  – передаточная функция стационарного линейного преобразования,

$L$  – символ преобразования Лапласа,

$p$  – переменная преобразования Лапласа.

При описании процесса смешивания сыпучих материалов методами *теории управления* [59, 60], для получения «выходного сигнала» смеситель рассматривают в форме преобразователя «входного возмущения», как и при кибернетическом подходе. Целью здесь является получение функции распределения времени пребывания (ФРВП) частиц компонентов в рабочей камере устройства, которая строится по кривой отклика. Подбор входящих в ФРВП констант осуществляется по опытным данным для конкретных устройств, что также затрудняет учет механизмов смешивания сыпучих материалов [61].

Математическое моделирование процесса смешения на основе построения эмпирических соотношений между параметрами исследуемой смесительной системы и критерием качества получаемой смеси (уравнений регрессии) является весьма трудоемким. Как правило, такой подход не претендует на теоретическое обоснование получаемых соотношений.

Эмпирические модели пригодны для конкретных хорошо исследованных аппаратов. Они справедливы в исследованных диапазонах изменения параметров и не обеспечивают решение проблемы масштабного перехода [1, 3, 24-53].

Модель конвекции используется для описания формирования смеси, когда она подвергается ряду последовательных воздействий, включающих разделение и перетасовку [27, 62]. Известен подход к моделированию [63], состоящий в представлении аппарата комбинацией двух устройств: конвективного и диффузионного.

Метод построения функции распределения времени пребывания частиц (ФРВП) [1, 22, 64-66] заключается в том, что на входной питающий поток смесителя искусственно наносится возмущение конкретной формы. Затем на выходе смесителя исследуются последствия этого возмущения (строится кривая отклика). ФРВП определенная по этой кривой может быть использована в сочетании с принятой моделью потока смешения в рабочем объеме исследуемого смесителя. ФРВП не отражает эффекты микросмешивания и кинетику процесса. Метод исследования ФРВП связан с большим объёмом экспериментальных исследований и позволяет, построить кривую смешивания лишь для конкретного аппарата (в лучшем случае для группы подобных аппаратов) в достаточно узком диапазоне конструктивных и режимных параметров. Этот метод также не обеспечивает решение проблемы масштабных переходов.

Энтропийно-информационный подход [22, 67-69] используется при недостатке информации о процессе. В процессе эволюции к равновесному состоянию, в соответствии со вторым законом термодинамики, меняется значение энтропии, с которой могут быть связаны параметры качества смеси.

Для оценки меры неопределенности смеси может быть использована информационная энтропия [67]:

$$H(E) = -\sum_i P_i \log P_i, \quad (1.4)$$

где  $P_i$  – вероятность нахождения случайной величины в состоянии  $E_i$ .

Статистическая оценка информационной энтропии реальной смеси сыпучих материалов может быть определена по результатам анализа проб:

$$H_V = -\frac{1}{m_k} \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{m_k} \sum_{i=1}^k c_{ji} \log c_{ji}, \quad (1.5)$$

где  $k$  – количество проб в выборке;

$c_{ij}$  – удельная концентрация  $j$ -го компонента в  $i$ -ой пробе.

Относительная эффективность смешения определяется отношением:

$$\Phi_c = \frac{H(E)_{\max} - H_V}{H(E)_{\max}}, \quad (1.6)$$

где  $H(E)_{\max}$  – энтропия смеси, в которой в каждой пробе концентрации всех компонентов находятся в одном и том же отношении.

Теория марковских процессов [70-73] широко используется при моделировании процессов смешивания [1, 22, 24, 27, 74-93]. В работе [22] рассмотрены основные направления, в которых применяются модели данного типа. Дана их классификация, которая ниже сведена в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Использование теории марковских процессов при моделировании процессов смешивания сыпучих материалов

№ п/п	Модель	Математическая запись	Направленность
1	Диффузионное уравнение Колмогорова (непрерывные цепи Маркова)	$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial^2 (Df)}{\partial x^2} - \frac{\partial (Vf)}{\partial x}$	Моделирование сложных неидеальных многочастичных систем.
2	Кинетические модели	$\frac{dc_{A,B}^0}{dt} = -kc_{A,B}^0 + kD_{A,B}$	Случайный переход ключевого компонента из ячейки в ячейку.

Окончание таблицы 1.1

№ п/п	Модель	Математическая запись	Направленность
3	Уравнение диффузии в одномерном приближении	$\frac{\partial c_A^0}{\partial t} = F(c_A^0) + D_A \frac{\partial^2 c_A^0}{\partial l^2}$	В непрерывно действующих смесителях
4	Модель марковского процесса рождения-гибели популяций	$\frac{d}{dt} c_A^0 = -kl^{\gamma_{nt}} [l_A^{02} - D_A]$	Описание смешивания с сопутствующим процессом измельчения
5	Дифференциально-разностные уравнения Колмогорова	$\frac{dP_{x_i}(t)}{dt} = \lambda_{x_{i-1}} P_{x_{i-1}}(t) - (\lambda_{x_i} + \mu_{x_i}) P_{x_i}(t) + \mu_{x_{i+1}} P_{x_{i+1}}$	Смешивание под действием силового поля
6	Кинетические модели оценки смесителя по изменению моментов распределения	$\frac{d}{dt} (c_{A,B} - m_{A,B}) = -k(c_{A,B} - m_{A,B})^2 + kD_{A,B}$	Оценка однородности смеси по математическим ожиданиям и дисперсиям концентрации компонентов

Примечания к таблице —  $f = f(x_0, t_0, x, t)$  — функция плотности вероятности, определяющая вероятность того, что частица некоторого ключевого компонента первоначально находящаяся в  $x_0$  перейдет в  $x$  за время  $\Delta t = t - t_0$ .  $D = D(x, t)$ .

$V = V(x, t)$  — диффузионный коэффициент и скорость сноса, соответственно.  
 $k = \mu(N_A a' + N_B b')$  — константа скорости смешения,  $a' = a\gamma_A V_A$ ,  $b' = b\gamma_B V_B$ ,  
 где  $a$  и  $b$  — число частиц, входящих в объединения А и В;

$V_A, V_B$  — объемы частиц;

$\gamma_A$  и  $\gamma_B$  — удельные веса;

$N_A$  и  $N_B$  — число объемов объединений А и В.

$c_A^0 = c_A - m_A$ ,  $c_B^0 = c_B - m_B$  — центрированные относительные весовые концентрации компонентов:

где  $m_A$  и  $m_B$  – математические ожидания, соответствующие рецептурному составу смеси;

$D_A$  и  $D_B$  – дисперсии компонентов;

$l$  – пространственная координата;

$D_A$  – коэффициент диффузии, характеризующий изменения  $c_A$  вдоль оси аппарата;

$F(c_A^0)$  – характеризует изменение  $m_A$  под действием силового поля;

$\gamma_n$  – коэффициент пропорциональности в диапазоне интенсивности однородного марковского процесса рождения-измельчения;

$D_A$  – дисперсия, замедляющая процесс смешения компонента А.

$x_i = \overline{x_{i_n}, x_{i_k}}$  – интенсивности рождения  $\lambda_{x_i}$  и гибели  $\mu_{x_i}$ .

$m_A, m_B$  – математические ожидания концентраций компонентов А и В,

$D_A, D_B$  – дисперсии концентраций этих компонентов.

Процесс смешивания в марковских ячеечных моделях [6, 94-96] рассматривается как случайный переход ключевого компонента из ячейки в ячейку, на которые разбит объем смесителя. Каждой ячейке соответствуют несколько вероятностей – вероятность ключевого компонента остаться в ячейке, перейти в соседнюю ячейку и вероятность перехода ключевого компонента из соседних ячеек. Фиксируя вероятности состояния через определенный промежуток времени, можно наблюдать за изменением качества смеси. Считается, что распределение вероятностей случайной величины зависит только от значений предыдущего шага и не зависит от всех остальных.

Известен подход к описанию процесса смешивания сыпучих разреженных потоков, в котором успешно использована теория ударных процессов [34]. Первоначально эта теория была разработана для описания течения жидких струй и разделения суспензий [34]. Применительно к описанию процессов смешения сыпучих материалов после удара о рабочие элементы смесителя моделировались функции распределения частиц по их диаметрам или углу распыливания после

отрыва от вращающихся рабочих элементов (бил) [97-107]. При этом учитывался случайный характер столкновений частиц (в том числе вторичных). Интерес представляет также энергетический подход к описанию процесса смешивания частиц сыпучих материалов в разреженных потоках [100]. Определяющую роль при моделировании играет формирование энергии стохастического движения частиц компонентов [100] в выбранном элементе фазового пространства в зависимости от параметров аппарата и компонентов смеси. Авторы записывают и решают кинетические уравнения типа Фоккера-Планка в энергетическом представлении [100].

Одним из наиболее обоснованных методов математического описания процесса смешивания является применение методов механики сплошных сред. Однако при их практической реализации приходится сталкиваться со сложной проблемой решения системы дифференциальных уравнений [108-110]. Это, прежде всего методы, в которых используется принцип взаимопроникающих континуумов [108], а также методы многоскоростных дисперсных потоков [109, 110]. Сложность практической реализации этих методов связана с проблемой решения системы уравнений механики многофазных сред, что связано с турбулентным характером и трехмерностью движения фаз системы, необходимостью учета явления столкновений, влияния перемешивающего органа смесителя и т.д. [110].

Достаточно перспективным методом моделирования смешивания сыпучих материалов представляется метод дискретных элементов (DEM) [7, 111-128]. В основе метода моделирования лежит представление сыпучего материала в виде совокупности модельных частиц, взаимодействующих между собой и подвергающихся воздействию со стороны рабочих органов устройства и внешних силовых полей. Решение системы уравнений движения для модельных частиц с учетом всех действующих на них сил позволяет получить картину пространственного распределения фракций материала в рабочем объеме устройства и поля скоростей в нем в каждый момент времени.

В заключение следует отметить, что в связи с бурным развитием компьютерной техники, появлением вычислительных программ, обладающих

существенными возможностями за последние десятилетия всё большее применение для описания процессов смешивания сыпучих материалов, находит численное моделирование. Оно представляется особенно удобным при описании процессов гравитационно-пересыпного смешивания как с помощью метода дискретных элементов [7, 112, 123, 126-129], так и с использованием теории марковских процессов [5, 6, 130-134].

### 1.3 Выводы по главе 1

1. Среди общих недостатков рассмотренных смесителей можно отметить их сравнительно высокую металлоемкость и сложность конструкции, а также, в ряде случаев, недостаточную надежность.

2. В полной мере не используется возможности ступенчатой конструкции аппаратов для повышения их эффективности (например, использование метода разбавления для приготовления смесей с малыми добавками).

3. В разрабатываемых конструкциях необходимо сочетание различных способов подавления сегрегации сыпучей смеси.

4. В рамках предложенной классификации проведён анализ известных моделей процесса смешивания сыпучих материалов. Отмечено, что наиболее обоснованными подходами к моделированию являются методы механики сплошных сред, а также стохастические модели в силу природы процесса смешивания. Наиболее эффективно при описании процессов гравитационно-пересыпного смешивания численное моделирование.

## ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В СТУПЕНЧАТОМ БАРАБАННО- ВИНТОВОМ СМЕСИТЕЛЕ

### 2.1 Разработка принципиальной схемы смесителя для приготовления смесей с малыми концентрацией целевого компонента

Среди механических процессов, применяемых во многих отраслях химической промышленности, а также в целом ряде других производств смешивание сыпучих материалов является одним из наиболее распространенных. Решение основной задачи, с которой приходится сталкиваться при реализации этого процесса – получение однородных по составу сыпучих смесей, как правило, осложнено рядом сопутствующих трудностей. Они связаны с широким спектром изменения физико-механических свойств перерабатываемых материалов, требованиями к качеству и составу продукта, производительности, энерго- и металлоемкости оборудования. В данной работе ставится задача разработки смесителя для приготовления однородных сыпучих составов склонных к сегрегации с малой концентрацией (порядка 0,1) ключевого компонента.

При разработке принципиальной схемы смесителя применялась ступенчатая конструкция. Смеситель такой конструкции обеспечивает переработку компонентов с использованием метода разбавления [24]. Суть этого метода заключается в следующем. Один из компонентов, который входит в целевую смесь в малых количествах, смешивается с другим из компонентов приблизительно в равных долях. Затем к полученной смеси добавляют другой компонент (транспортирующий) также, приблизительно в равной пропорции со смесью. Процесс разбавления повторяют до получения смеси с необходимой концентрацией меньшего по количеству компонента. Причем этот компонент желательно иметь более тонкодисперсным. Кроме того, обеспечение эффективности проектируемого технического устройства связано с решением задач, среди которых – совершенствование реализуемого технологического

процесса, выбор рациональных параметров процесса и устройства, продление его срока службы (ресурса) и ряд других.

Также другие методы повышения эффективности [135, 136, 137], рассмотренные в 1 главе были использованы при разработке барабанно-винтового ступенчатого смесителя сыпучих материалов [134]. В конструкции смесителя используются эластичные желоба, выполненные из отработавших ресурс автомобильных покрышек [7, 139].

### 2.1.1 Описание конструкции смесителя

Смеситель сыпучих материалов [134], разработанный в ходе исследований, показан на рисунке 2.1.

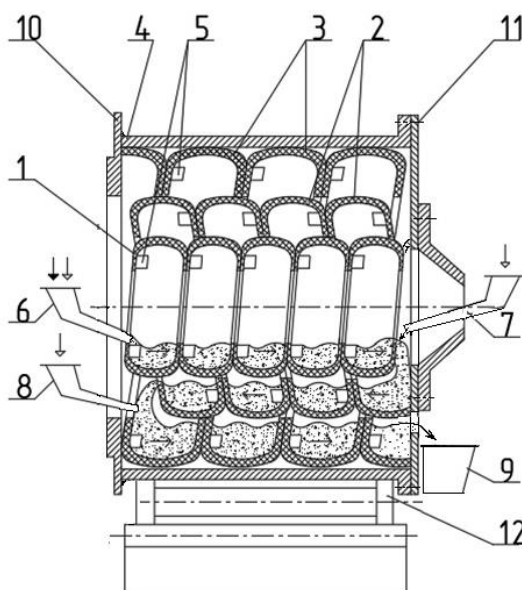


Рисунок 2.1 – Общий вид смесителя сыпучих материалов

Он содержит корпус, выполненный в виде сообщающихся торообразных эластичных камер, которые соединены с образованием трех ступеней 1, 2, 3 винтовых желобов, установленных коаксиально в цилиндрической трубе 4. Внутри камер установлены лопасти 5, изготовленные из элементов их бортов. Ступень 1 корпуса сообщается с патрубком загрузки 6, а ступени 2 и 3 соединены с патрубками 7 и 8 (соответственно) дополнительной загрузки материала. Ступень 3

корпуса смесителя соединена также с патрубком выгрузки смеси и приемным бункером 9. Цилиндрическая труба 4 с крышками 10 и 11 установлена на роликах 12, связанных с приводом вращательного движения (не показан). Смешиваемые компоненты из патрубка загрузки 6 через отверстие в крышке 10 поступают во внутреннюю торообразную эластичную камеру - на ступень 1. При включении привода цилиндрическая труба 4 со ступенями 1, 2, 3 начинают вращаться. Компоненты, находящиеся внутри нее, движутся в режиме переката, то есть поднимаются вверх и, достигнув некоторого уровня, обрушиваются. Перемешивание компонентов происходит преимущественно в потоке обрушения материала. Лопастями 5, проходя через смесь, оказывают на нее дополнительное перемешивающее (конвективное) воздействие. Компоненты смеси перемешиваются и, одновременно, перемещаются вдоль оси корпуса, внутри ступени 1, образуя винтовой желоб и пересыпаются на ступень 2. Одновременно на поверхность смеси из патрубка 7 осуществляется дополнительная загрузка одного (или нескольких) компонентов. При перегрузке происходит предварительное перемешивание смеси, полученной на участке ступени 1 и компонента (транспортирующего), поступающего из патрубка 7. Транспортирующий компонент, поступающий из патрубка 7, дозируется в соотношении 1:1 со смесью, полученной на участке ступени 1. Этим достигаются наилучшие условия смешивания на участке ступени 2, механизм которого аналогичен механизму смешивания на участке ступени 1. На участке 2 компоненты перемещаются вдоль оси корпуса влево и пересыпаются в винтовой желоб участка 3. При этом из патрубка 8 вновь добавляется транспортирующий компонент в соотношении 1:1 со смесью, полученной на участке ступени 2. Затем процесс смешивания повторяется на ступени 3. Из винтового желоба участка 3 готовая смесь выгружается в приемный бункер 9.

При реализации процесса смешивания сыпучих материалов в барабанно-винтовом аппарате [134] используется метод "разбавления" и ступенчатого проведения процесса. Это позволяет добиться однородности смеси при небольшой концентрации ключевого компонента. Применение конвективного воздействия за

счет лопастей внутри камер также способствует равномерному смешиванию материалов. Дозагрузка транспортирующего компонента на последних ступенях с уменьшением концентрации ключевого компонента создает оптимальные условия для получения необходимой однородной смеси.

## 2.2 Экспериментальные исследования нового смесителя сыпучих материалов

### 2.2.1 Постановка задач исследования. Разработка лабораторной установки

Основными задачами исследований являлись [127, 139, 140]:

- оценка эффективности применения ступенчатого барабанно-винтового смесителя сыпучих материалов [134] на основе сопоставления его работы с работой одноступенчатого аппарата;

- установление влияний конструктивных параметров (числа и длин ступеней) смесителя [Приложение А] на критерий качества получаемых сыпучих смесей, склонных к сегрегации.

Первая задача связана с установлением целесообразности применения смесителя ступенчатой конструкции для получения смеси с малой концентрацией целевого компонента. Решение второй задачи, направленной на установление основных закономерностей поведения критерия однородности получаемой смеси, должно определить метод моделирования процесса смешивания в новом аппарате и создать предпосылки к расчету нового смесителя.

Экспериментальная установка (рисунок 2.3) отличается от смесителя [134] описанного выше (рисунок 2.1) тем, что ступени 1, 2, 3 выполнены цилиндрическими и имеют прозрачные крышки, аналогичные крышкам 10, 11, а ячейки, в которые подаются компоненты, образованы винтовыми шнеками с лопастями (на рисунке 2.1 не показаны). Основные узлы смесителя сыпучих материалов показаны на рисунке 2.2. Общий вид лабораторной установки показан на рисунке 2.3.

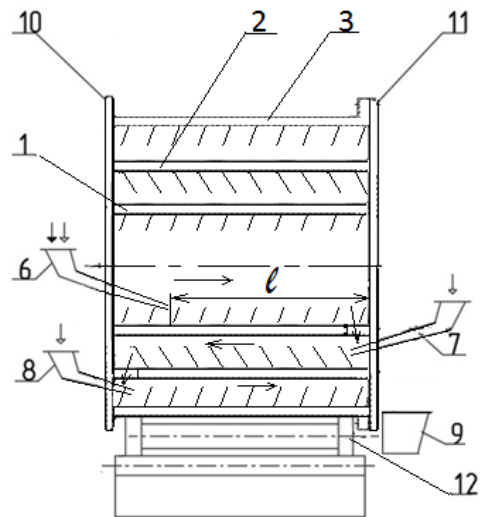


Рисунок 2.2 – Схема лабораторной установки для исследования ступенчатого барабанно-винтового смесителя



Рисунок 2.3 – Общий вид лабораторной установки

### 2.2.2 Разработка методики проведения исследований и способа определения качества смеси в барабанно-винтовом смесителе

Основными задачами, решаемыми на этапе разработки методики проведения эксперимента, являются, во-первых, выбор критерия оценки качества

(однородности) смеси, а, во-вторых, определение способа нахождения этого критерия. В качестве критерия оценки однородности сыпучей смеси (выходного параметра) был принят коэффициент неоднородности [1]:

$$V_c = \frac{1}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}, \quad (2.1)$$

где  $\bar{c}$  – средняя по объему смеси массовая или объемная концентрация ключевого компонента,

$c_i$  – концентрация ключевого компонента в  $i$ -ой пробе,

$n$  – количество проб.

При использовании бесконтактного метода исследования однородности смеси [140], был апробирован подобный (2.1), интегральный критерий [7,31,33], учитывающий степень однородности смеси в широком спектре масштабов проб.

Для осуществления контроля качества смеси на практике важную роль играют методы получения информации о распределении ключевого компонента смеси в исследуемом объеме. Эти методы разделяют на контактные и бесконтактные.

Контактные методы основаны на физическом извлечении проб конкретного, рассчитываемого объема из исследуемой смеси и последующем определении концентрации ключевого компонента в них с помощью физических или химических методов анализа [1]. Основными недостатками контактных методов исследования смесей являются их сравнительная трудоемкость, необходимость прерывать работу аппарата с целью отбора проб, искажения структуры смеси, вносимых пробоотборником. Кроме того, при использовании контактных методов практически невозможно провести анализ одной и той же смеси несколько раз, меняя размер пробоотборника, что необходимо для вычисления различных критериев качества.

Таких недостатков лишены бесконтактные методы анализа смесей, развивающиеся в последнее время [4]. Эти методы основаны на способности вещества ключевого компонента поглощать, отражать, рассеивать или испускать электромагнитные волны в каком-либо диапазоне частот с интенсивностью,

пропорциональной концентрации ключевого компонента в исследуемой области смеси, что позволяет получать информацию о распределении частиц смешиваемых фракций без извлечения проб из исследуемого объема.

Наиболее доступными и дешевыми из бесконтактных методов оценки качества сыпучих смесей являются, по-видимому, методы, основанные на анализе фотоизображения поверхности смеси [141-145].

Базовая схема реализации способа заключается в следующем. Черно-белое фотографическое изображение поверхности рабочего объема устройства, перпендикулярной оси, вдоль которой смесь является однородной, подвергается компьютерной обработке, в ходе которой на фотографии сначала отделяется область, занятая смесью. Затем эта область разбивается на квадратные пробные зоны одинакового размера, в каждой из которых концентрация ключевого компонента вычисляется как отношение площади зоны, занятой ключевым компонентом, к площади всей зоны [142]. По найденным концентрациям вычисляется коэффициент неоднородности. Этот метод достаточно прост, надежен и апробирован для смесителей периодического действия, однако, при оценках однородности смесей, получаемых в аппаратах непрерывного действия его использовать невозможно. Дело в том, что в этом случае доступным для фиксации и анализа является только поверхность смеси на выходе из аппарата и невозможно определить критерии однородности смеси для промежуточных сечений. Тем не менее, в тех случаях, когда смеситель не имеет дополнительных перемешивающих элементов, или элементы одинаковы и установлены с постоянным шагом вдоль оси корпуса этот метод может быть использован при исследованиях изменения качества смеси по длине аппарата непрерывного действия. На рисунках 2.4 и 2.5 приведены схемы реализации бесконтактных методов, позволяющих преодолевать этот недостаток [142-144]. На рисунке 2.4 показана схема доработки и использования способа [144] при исследованиях аппарата непрерывного действия.

Установка содержит корпус 1, соединенный с приводом вращения, патрубков загрузки компонентов 2, отверстие разгрузки смеси 3, выполненное в прозрачной крышке корпуса 4 и приемный бункер 5. Компоненты подают в корпус смесителя

через патрубок 2. При вращении корпуса они смешиваются и двигаются к прозрачной крышке 4. После начала разгрузки смеси через отверстие 3 привод останавливают. Поперечное сечение смеси фиксируют через прозрачную крышку 4, проводят анализ сечения и определяют критерий однородности смеси.

В данной работе этот способ используется при исследованиях влияния параметров одноступенчатого барабанно-винтового смесителя на качество получаемой смеси.

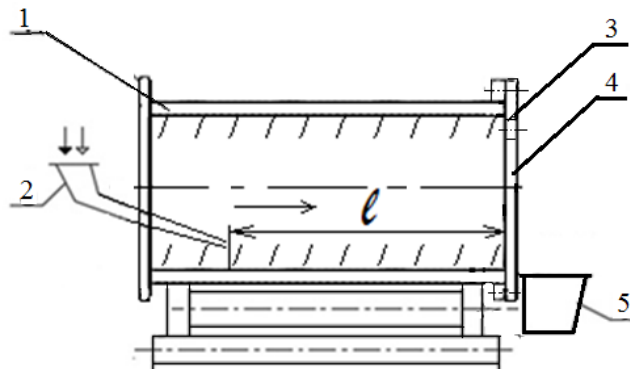


Рисунок 2.4 – Схема использования способа при исследовании качества смеси в смесителе непрерывного действия

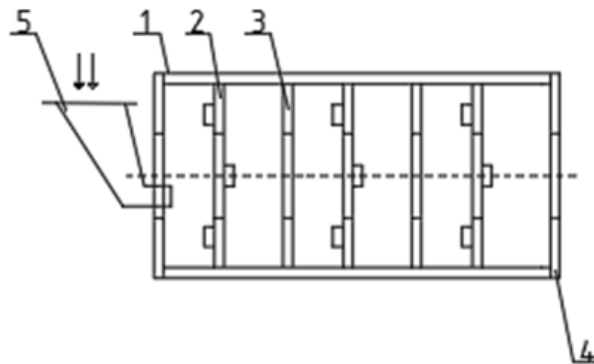


Рисунок 2.5 – Схема использования способа при исследовании качества смеси в смесителе непрерывного действия

Определять значения критерия качества в различных сечениях смеси, т.е. в зависимости от длины корпуса (барабана) смесителя непрерывного действия, не извлекая из него смеси, в ряде случаев, позволяет применение способа [7, 145]. Для его реализации внутри корпуса смесителя, в исследуемых сечениях материала

устанавливаются прозрачные поперечные перегородки, которые последовательно, после проведения анализа изображения поверхности смеси в конкретном сечении снимаются, сыпучий материал, находящийся за снятой перегородкой удаляется, и анализ повторяется для следующего сечения смеси. Схема установки показана на рисунке 2.4. Внутри корпуса 1 размещены ступени 2 с рабочими лопастями, прозрачные кольцевые перегородки 3 и прозрачные торцевые стенки 4. Загрузка компонентов происходит через патрубок 5. Снимая кольцевые перегородки и, последовательно удаляя смесь, находящуюся перед следующими перегородками, проводят анализ по указанной методике и получают мгновенные значения коэффициентов неоднородности сыпучего материала в сечениях смесителя.

Применение и этого способа исследования также ограничено. Невозможно его использование для исследования смеси в аппаратах с перемешивающими элементами, исключающими установку дополнительных перегородок внутри корпуса (шнековыми, ленточными и рядом других). Кроме того, при использовании этого способа число перегородок, устанавливаемых в исследуемых сечениях смеси (и исследуемых сечений), должно быть небольшим. В противном случае, меняется характер движения частиц и уменьшается величина объема загрузки исследуемого смесителя.

Для исследования однородности смеси в аппарате непрерывного действия с дополнительными перемешивающими элементами произвольного типа был разработан и апробирован в барабанно-винтовом ступенчатом аппарате [134] способ [144].

Устройство для реализации данного способа включает смеситель и транспортер (рисунок 2.6). Смеситель содержит корпус 1, соединенный с приводом вращения 2, дозаторы (не показаны), бункер 3 загрузки компонентов и бункер 4 выгрузки смеси. В нижней части корпуса 1 выполнена продольная прорезь 5 с заслонкой 6. Под смесителем размещен приводной транспортер 7 с приводом 8. Фиксация поверхности смеси осуществляется фотокамерой, размещенной над лентой транспортера (фотокамера не показана). При реализации способа включается привод 2 вращения корпуса 1. После дозирования компоненты подаются

в бункер загрузки 3 и, через отверстие в торцевой стенке, попадают в корпус 1 смесителя, где начинается процесс их смешивания. При этом компоненты перемещаются внутри корпуса 1. После установления стабильного режима перетекания компонентов в бункер 3 привод выключается, и корпус 1 смесителя останавливается таким образом, чтобы прорезь 5 оказалась над лентой транспортера. Зазор между лентой транспортера и прорезью определяет высоту слоя и выбирается таким образом, чтобы при выключенном транспортере и открытой заслонке 6 смесь не растекалась по ленте транспортера.

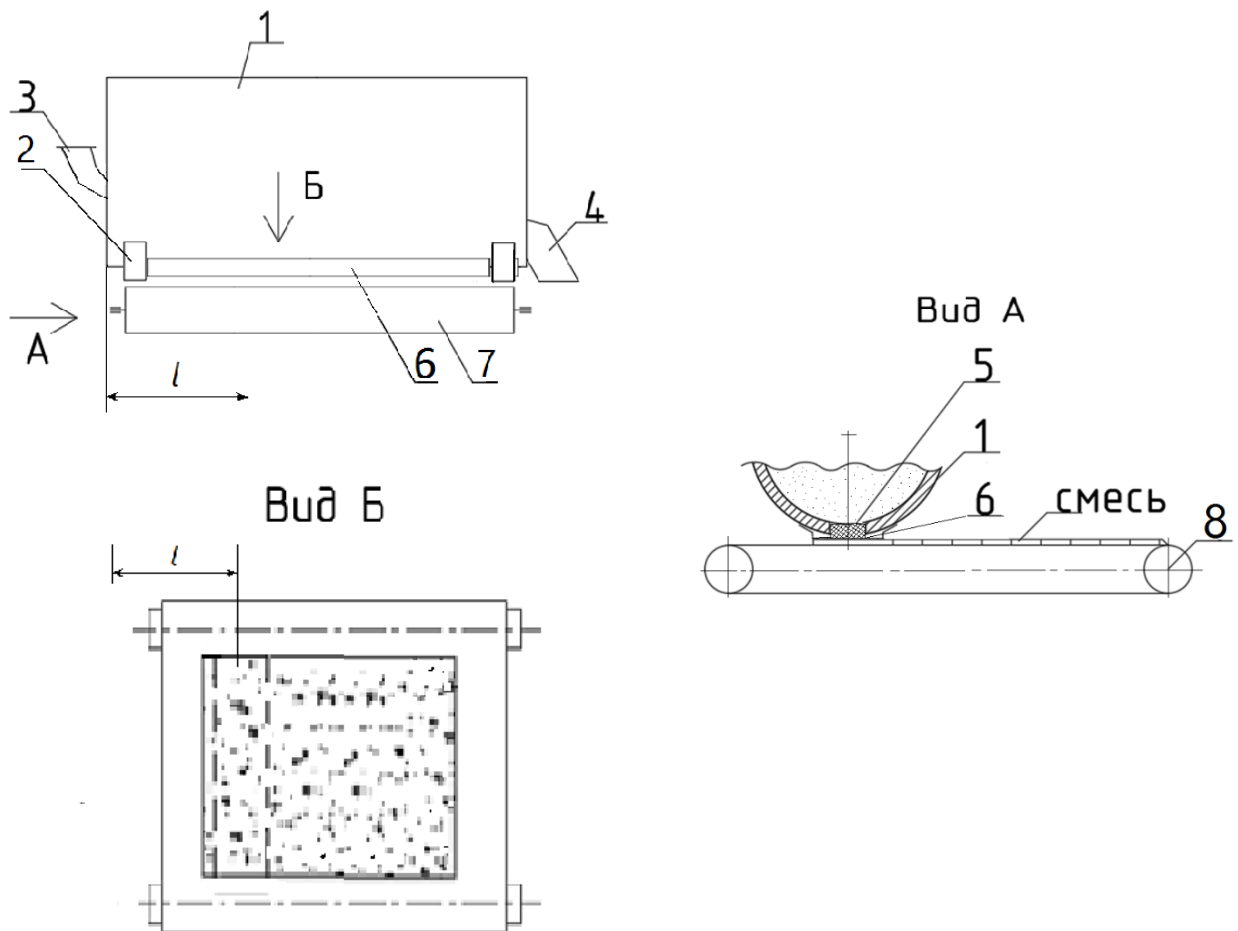


Рисунок 2.6 – Устройство (смеситель и транспортер) для осуществления способа исследования качества смеси компонентов

Затем заслонка открывается и включается привод транспортера. Смесь при движении ленты распределяется по ней слоем, ширина которого примерно равна ширине прорези, а высота определяется размером зазора между прорезью и лентой транспортера. После полной послойной разгрузки смеси из корпуса смесителя

привод транспортера выключается и лента останавливается. Поверхность смеси фиксируется с помощью цифровой фотокамеры. Затем проводится анализ этого изображения посредством деления его на пробные зоны и вычисления в них концентраций ключевого компонента с последующим определением коэффициента неоднородности и его корректировкой с учетом случайных колебаний числа частиц ключевого компонента на поверхности наблюдения. При этом анализ с определением коэффициента неоднородности проводится для каждой полосы смеси, на которые условно разбивается её поверхность в направлении, поперечном к направлению движения ленты. Таким образом, определяются коэффициенты неоднородности смеси, для сечений, находящихся на конкретных расстояниях  $l$  от места загрузки компонентов. В результате анализа получают зависимость качества (коэффициента неоднородности) смеси от длины смесителя.

Данный способ определения качества смеси компонентов является комбинированным. Хотя исследуемая смесь извлекается из аппарата, однако, после её послойного распределения на ленте, можно установить – какому участку слоя в аппарате соответствует конкретный участок смеси на ленте (см. рисунок 2.6).

Затем применяется бесконтактный метод исследования смеси, находящейся на ленте. После анализа изображений этих участков можно построить зависимость коэффициента неоднородности смеси от длины корпуса смесителя [147, 148] (расстояния от места загрузки компонентов до исследуемого сечения смеси).

Метод [7, 145], при использовании которого поверхность смеси фиксируется через прозрачную перегородку, является более простым в применении (см. рисунок 2.5). Поэтому он использовался при возможности загрузки смеси по всей длине ступени. Также применялся гравиметрический метод определения коэффициента неоднородности для проверки корректности использования бесконтактных методов.

### 2.2.3 Исследование влияния параметров смесителя на качество получаемой смеси

В качестве исследуемых параметров системы смеситель – сыпучий материал, с учетом диапазонов их варьирования были приняты следующими:

- конструктивные:  $d_{в} = [0,15; 0,23; 0,375]$ , м – внутренние диаметры ступеней рабочих камер ступенчатого смесителя,  $l = [0,01–0,4]$ , м;

- длина пути материала по ступени, внутренний диаметр рабочей камеры одноступенчатого смесителя и длина пути материала:  $d_{в} = 0,23$ , м,  $l = [0,01–1,2]$ , м по ступеням. Углы наклона лопастей к плоскости поперечного сечения рабочей камеры:  $\alpha = 45^\circ$  приняты на основе исследований [7, 128] из рекомендуемого интервала  $35-60^\circ$ . Шаг винтового шнека и его высота по ступеням, соответственно:  $s = [0,03; 0,035; 0,05]$ , м;  $h = [0,045; 0,055; 0,07]$ , м;

- режимные:  $n$  - частота вращения корпуса  $[30, 60]$  об/мин,  $c = 0,125$ -концентрация ключевого компонента готовой смеси,  $c = [0,5; 0,25; 0,125]$  – концентрация ключевого компонента смеси по ступеням;

- физико-механические: средние диаметры частиц компонентов (просо, манная крупа)  $d_1 = 0,225$ , см  $d_2 = 0,03$ , см; насыпные плотности материалов  $\rho_1 = 0,84$  г / см<sup>3</sup>;  $\rho_2 = 0,66$  г / см<sup>3</sup>.

В качестве критерия оценки однородности сыпучей смеси (выходного параметра) был принят коэффициент неоднородности [1]. При исследованиях коэффициент неоднородности смеси определялся бесконтактным методом, обработка результатов эксперимента осуществлялась методом наименьших квадратов с последующим поиском уравнения приближенной регрессии, связывающего коэффициент неоднородности смеси с параметрами смесителя. Для оценки качества аппроксимации, как и в работе [7] была использована величина достоверности аппроксимации (коэффициент детерминации)  $R^2$ . Длина пути материала (рабочая длина ступени  $l$ ) менялась за счет изменения места загрузки компонентов через патрубки 6, 7, 8 (см. рисунки 2.2, 2.3).

## 2.2.4 Результаты экспериментальных исследований ступенчатого барабанно-винтового смесителя

В данном разделе приведены результаты экспериментов, проведенных для последующего сопоставления эффективности процессов смешивания в трехступенчатом барабанно-винтовом смесителе [134] и в одноступенчатом аппарате [147, 148].

Результаты исследований – зависимости коэффициента неоднородности смеси  $V_c$  от длин соответствующих ступеней, показаны на рисунках 2.7-2.14. На этих рисунках кривая смешивания 1 является результатом аппроксимации эксперимента (значений коэффициента неоднородности смеси) в интервале  $l=[0,01-1,2]$ , м. На рисунках 2.6-2.9 она отражает изменение коэффициента неоднородности в одноступенчатом барабанно-винтовом смесителе в зависимости от длины барабана  $l$ :  $V_c = 51,9e^{-36,3l} + 15$ ,  $R^2 = 0,92$ .

На всех графиках символы отражают результаты эксперимента, а линии их аппроксимацию.

Для удобства сопоставления поведения смеси в одноступенчатом и в трехступенчатом смесителях кривая 1 приведена на каждом из графиков (см. рисунки 2.7, 2.8 и 2.9). Кривая смешивания 2 отражает изменение коэффициента неоднородности смеси в ступенчатом барабанно-винтовом смесителе в зависимости от длины ступени  $l$ .

На рисунке 2.7 кривая 1 построена по результатам исследования непрерывного приготовления смеси в одноступенчатом смесителе ( $c=0,125$ ), кривая 2 - при ступенчатом смешивании на первой ступени ( $c=0,5$ ).

На рисунке 2.8 кривая 1 построена по результатам исследования непрерывного приготовления смеси в одноступенчатом смесителе ( $c=0,125$ ), кривая 2- при ступенчатом смешивании на второй ступени ( $c=0,25$ ).

На рисунке 2.9 кривая 1 построена по результатам исследования непрерывного приготовления смеси в одноступенчатом смесителе ( $c=0,125$ ), кривая 2 - при ступенчатом смешивании на третьей ступени ( $c=0,125$ ).

Ниже приведены результаты аппроксимации экспериментальных значений коэффициента неоднородности смеси на первой, второй и третьей ступенях с помощью экспоненты, а также значения коэффициента детерминации  $R^2$ , соответственно:

- первая ступень:  $V_C = 51,02e^{-29,9l} + 9,02$ ,  $R^2 = 0,999$ ;

- вторая ступень:  $V_C = 3,75 \cdot 10^5 e^{-24,93l} + 13,87$ ;  $R^2 = 0,95$ ;

- третья ступень:  $V_C = 3,75 \cdot 10^7 e^{-17,15l} + 10,3$ ;  $R^2 = 0,93$ .

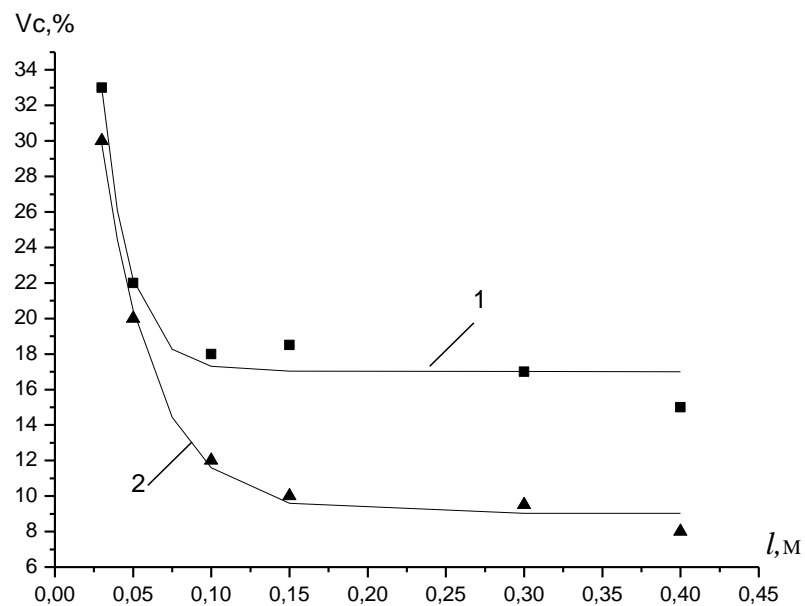


Рисунок 2.7 – Зависимость коэффициента неоднородности сыпучей смеси, склонной к сегрегации (просо – манная крупа) от длины  $l$  корпуса одноступенчатого барабанно-винтового смесителя (кривая 1) и от длины  $l$  первой ступени барабанно-винтового смесителя (кривая 2)

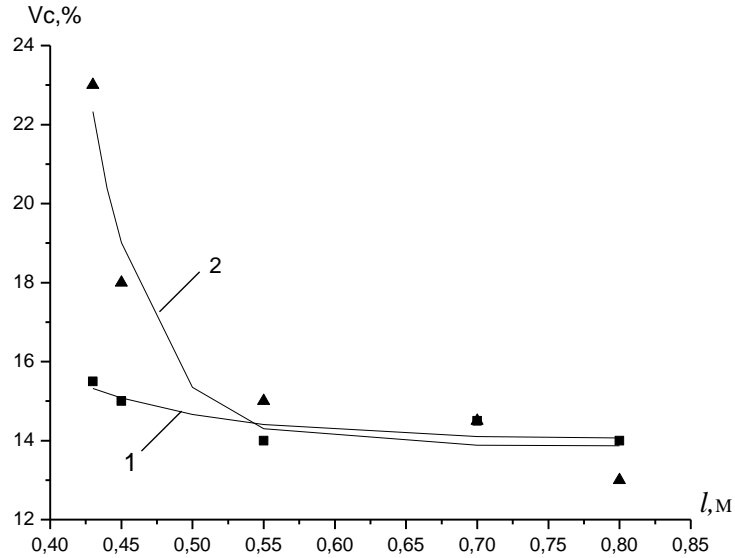


Рисунок 2.8 – Зависимость коэффициента неоднородности сыпучей смеси, склонной к сегрегации (просо – манная крупа) от длины  $l$  корпуса одноступенчатого барабанно-винтового смесителя (кривая 1) и от длины  $l$  второй ступени барабанно-винтового смесителя (кривая 2).

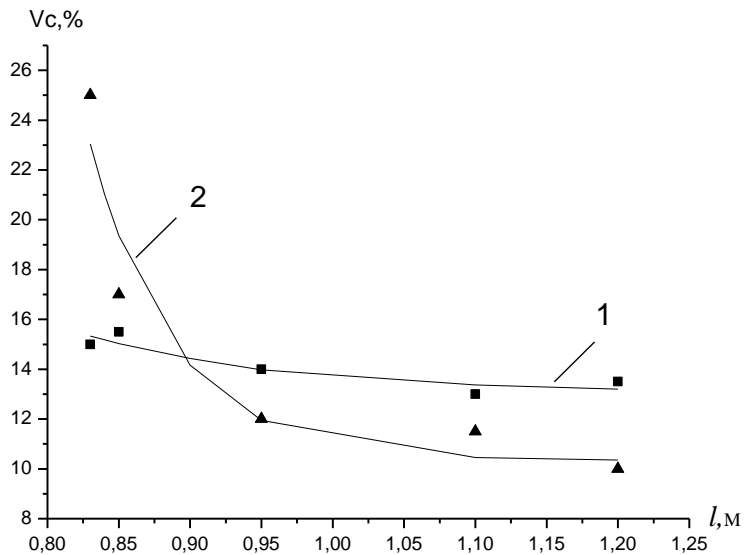


Рисунок 2.9 – Зависимость коэффициента неоднородности сыпучей смеси, склонной к сегрегации (просо – манная крупа) от длины  $l$  корпуса одноступенчатого барабанно-винтового смесителя (кривая 1), - от длины  $l$  третьей ступени барабанно-винтового смесителя (кривая 2),  $c=0,125$ .

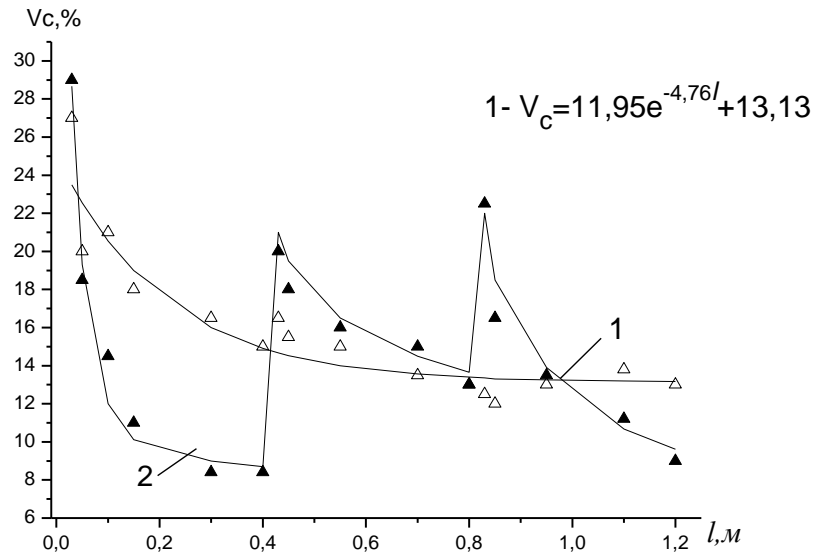


Рисунок 2.10 – Зависимость коэффициента неоднородности сыпучей смеси, склонной к сегрегации (просо – манная крупа) от длины  $l$  корпуса одноступенчатого барабанно-винтового смесителя (кривая 1) и от длины  $l$  корпуса трехступенчатого барабанно-винтового смесителя (кривая 2)

На рисунке 2.10 показана зависимость коэффициента неоднородности от длины  $l$  корпуса барабанно-винтового смесителя по ступеням с учетом колебаний однородности смеси при дозагрузке транспортирующего компонента между ступенями.

Следует отметить, что всплеск значений  $V_c$  для кривых смешивания 2 в местах дополнительной подачи транспортирующего компонента на второй и третьей ступенях связан с реализацией метода разбавления. В дальнейшем кривая 2 уходит ниже кривой 1 (см. рисунок 2.9), что отражает эффективность трехступенчатого аппарата [134], относительно одноступенчатого смесителя.

На рисунках 2.11-2.14 графически представлены результаты исследований процесса смешивания компонентов склонных к сегрегации по размерам и плотности частиц смеси (просо – манная крупа).

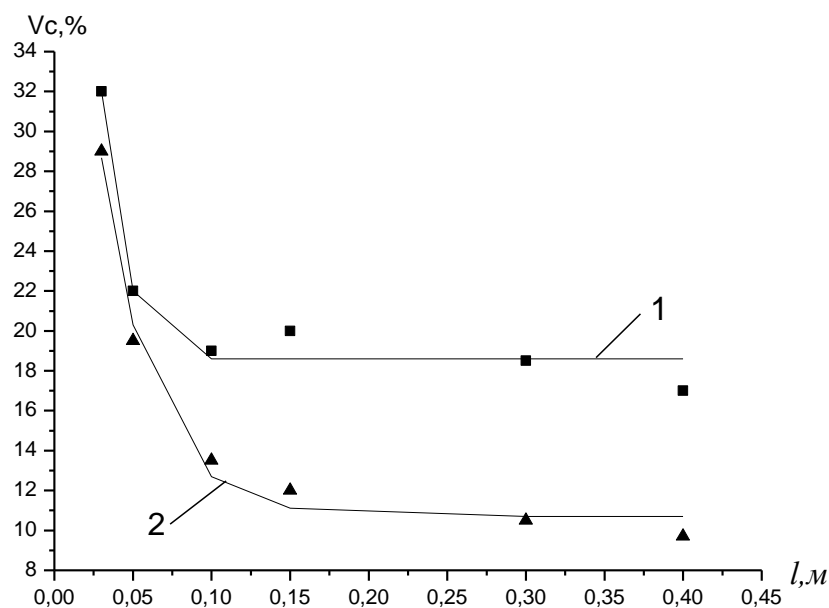


Рисунок 2.11 – Зависимость коэффициента неоднородности сыпучей смеси, склонной к сегрегации (просо – манная крупа) от длины  $l$  корпуса одноступенчатого барабанно-винтового смесителя (кривая 1) и от длины  $l$  первой ступени барабанно-винтового смесителя (кривая 2).  $c=0,0833$

Здесь рассматривается случай, при котором на первой ступени концентрация ключевого компонента составляет 0,33. На второй и третьей ступенях полученная смесь соединяется с транспортирующим компонентом в соотношении 1:1. Соотношение компонентов на выходе и аппарата составляет 1:11 (концентрация ключевого компонента равна  $C=0,0833$ ). При этом коэффициент неоднородности смеси, достигает приемлемых значений – порядка 12%. На рисунке 2.11 кривая 1 построена по результатам исследования непрерывного приготовления смеси в одноступенчатом смесителе ( $c=0,0833$ ), кривая 2 - при ступенчатом смешивании на первой ступени ( $c=0,33$ ).

На рисунке 2.12 кривая 1 построена по результатам исследования непрерывного приготовления смеси в одноступенчатом смесителе ( $c=0,0833$ ), кривая 2 – при ступенчатом смешивании на второй ступени ( $c=0,16$ ).

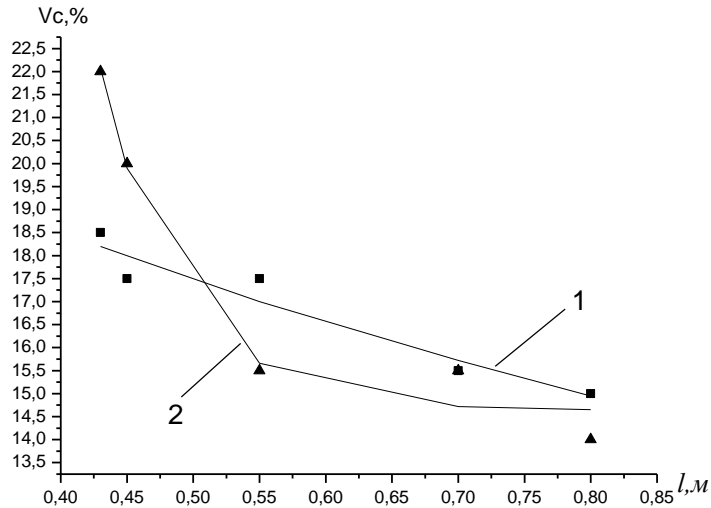


Рисунок 2.12 – Зависимость коэффициента неоднородности сыпучей смеси, склонной к сегрегации (просо – манная крупа) от длины  $l$  корпуса одноступенчатого барабанно-винтового смесителя (кривая 1) и от длины  $l$  второй ступени барабанно-винтового смесителя (кривая 2).  $c=0,0833$

На рисунке 2.13 кривая 1 построена по результатам исследования непрерывного приготовления смеси в одноступенчатом смесителе ( $c=0,0833$ ), кривая 2- при ступенчатом смешивании на третьей ступени ( $c=0,0833$ ).

На рисунке 2.14 показана зависимость коэффициента неоднородности от длины  $l$  корпуса барабанно-винтового смесителя по ступеням с учетом колебаний однородности смеси при дозагрузке транспортирующего компонента между ступенями.

Можно отметить, что кривая смешивания 2 (на рисунках 2.11-2.14), отражающая зависимость коэффициента неоднородности  $V_c$  по ступеням от значений их длин, проходит ниже смешивания кривой 1, построенной для одноступенчатого смешивания.

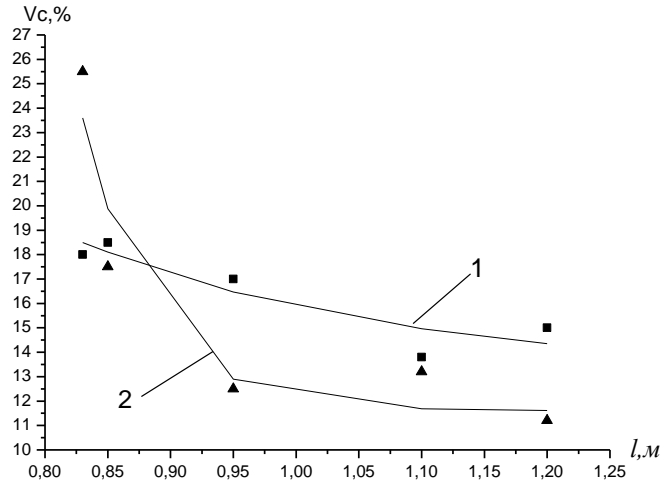


Рисунок 2.13 – Зависимость коэффициента неоднородности сыпучей смеси, склонной к сегрегации (просо – манная крупа) от длины  $l$  корпуса одноступенчатого барабанно-винтового смесителя (кривая 1), - от длины  $l$  третьей ступени барабанно-винтового смесителя (кривая 2),  $c=0,0833$

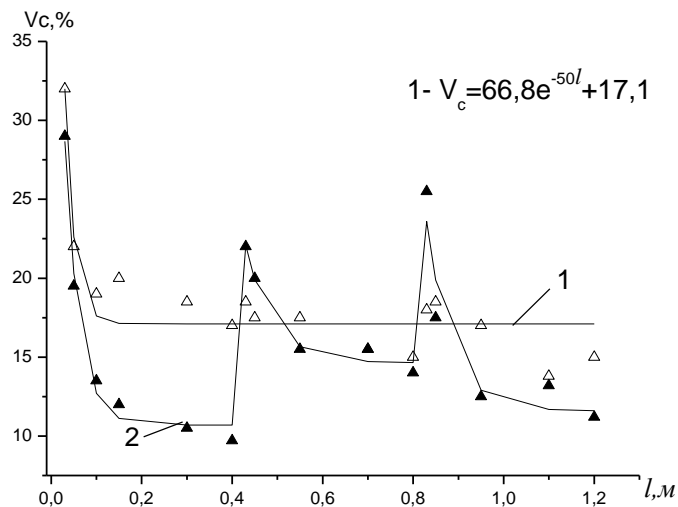


Рисунок 2.14 – Зависимость коэффициента неоднородности сыпучей смеси, склонной к сегрегации (просо – манная крупа) от длины  $l$  корпуса одноступенчатого барабанно-винтового смесителя (кривая 1) и от длины  $l$  корпуса трехступенчатого смесителя (кривая 2)  $c=0,0833$  одноступенчатого смешивания.

Смесь в обоих случаях достигает приемлемой однородности, соответствующей значению  $V_c \approx 12\%$ . Таким образом, ступенчатый аппарат

оказывается также более эффективным по критерию  $V_c$  при переработке сегрегирующей смеси с концентрацией ключевого компонента на выходе из аппарата равной  $C=0,0833$ . (соотношение компонентов 1:11).

## 2.2.5 Исследование влияния конструктивных параметров барабанно-винтового смесителя на качество получаемой смеси

В этом разделе приведены результаты экспериментальных исследований влияния шага и высоты борта винтового желоба смесителя на однородность получаемых смесей. Результаты исследований графически представлены на рисунках 2.15 и 2.16.

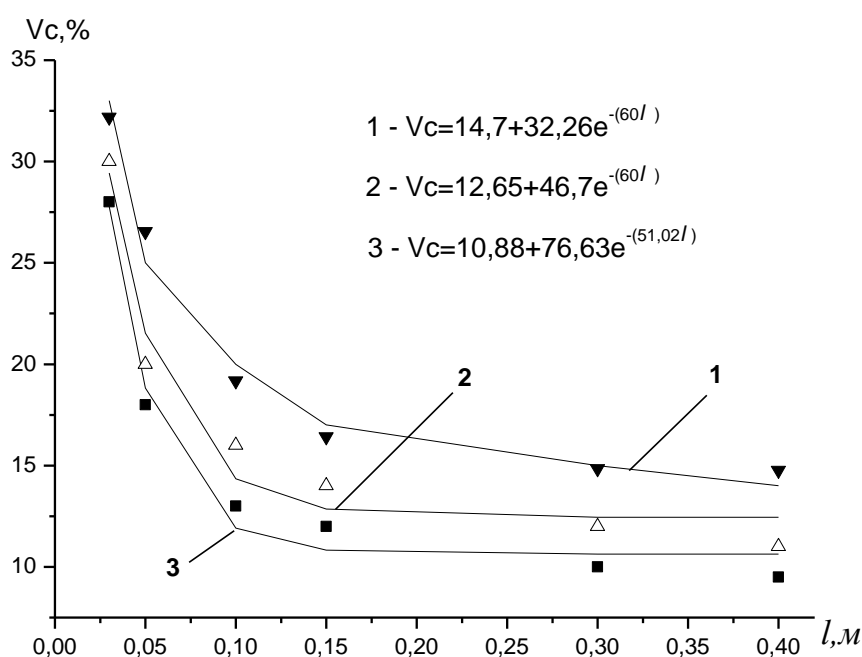


Рисунок 2.15 – Зависимость коэффициента неоднородности (символы - эксперимент, линии – аппроксимация) сыпучей смеси, от длины корпуса смесителя при различных значениях шага винтового желоба (1 -  $h_s=65$ , 2 -  $h_s=50$ , 3 -  $h_s=30$  мм)

Увеличение шага  $h_s$  желоба приводит также к увеличению пути (времени) смешивания и уменьшению объема материала в ячейках желоба, а следовательно,

и к росту однородности получаемой смеси. Этот факт отражает график, представленный на рисунке 2.15.

На рисунке 2.16 графически представлены результаты исследований влияния высоты борта желоба  $H$  на однородность получаемой смеси. Действительно, при увеличении высоты борта происходит увеличение коэффициента загрузки смесителя и соответствующий рост однородности получаемой смеси. В исследованиях [6,7,31] показано экстремальное влияние коэффициента загрузки  $K_z$  на однородность получаемой смеси, причем с минимальным значением  $V_c$ , соответствующим  $K_z=0.2 - 0.35$ . Этому значения коэффициент загрузки в данном аппарате не достигает. С этим фактом связано отсутствие минимального значения на графике, представленном на рисунке 2.16.

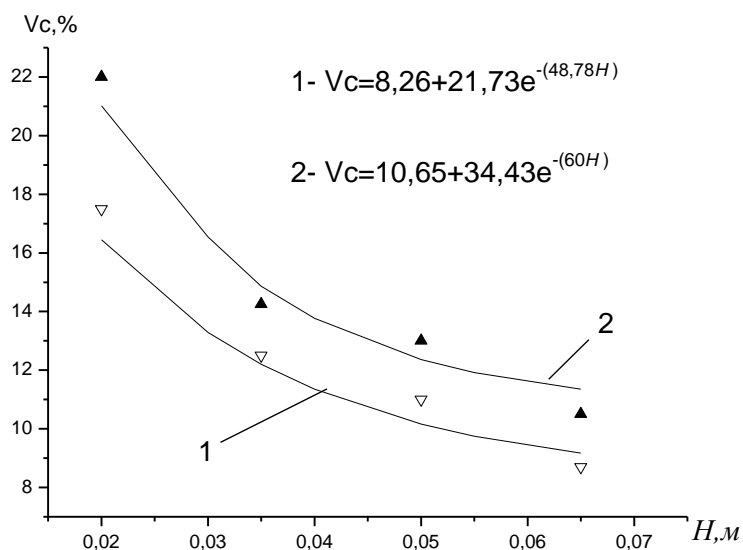


Рисунок 2.16 Зависимость коэффициента неоднородности (символы - эксперимент, линии – аппроксимация) сыпучей смеси от высоты  $H$  борта рабочей камеры, при различных диаметрах корпуса желоба (1 -  $D=228$ , 2 -  $D=400$  мм,  $h_s=50$ мм),  $l=1.2$ м

На рисунке 2.16 приведены результаты аппроксимации экспериментальных значений коэффициента неоднородности смеси кривых смешивания 1 и 2. Коэффициенты детерминации равны, соответственно, 1 -  $R^2 = 0,93$ . 2 -  $R^2 = 0,942$ .

Выводы по результатам экспериментальных исследований:

- эффективность одноступенчатого аппарата падает при достижении длины его корпуса 1,5 длины ступени ( $l = 0,6$  м). При этом, равновесное значение коэффициента неоднородности для смесей, склонных к сегрегации, достигает лишь  $V_c \approx 13,5\%$  для целевой смеси ( $c = 0,125$ ) и  $V_c \approx 17\%$  для целевой смеси ( $c = 0,083$ );

- ступенчатый барабанно-винтовой смеситель [134] позволяет поддерживать наилучшие условия смешивания, когда целевая смесь формируется поэтапно и на выходе из последней ступени имеет приемлемую однородность –  $V_c \approx 9,5\%$  ( $c = 0,125$ ) и  $V_c \approx 11,3\%$  ( $c = 0,083$ );

- исследования показывают преимущество ступенчатого барабанно-винтового аппарата перед одноступенчатым при переработке смеси с небольшой концентрацией ключевого компонента (0,125 и 0,083), склонной к сегрегации, как по крупности частиц, так и по их плотности;

получаемые кривые смешивания (типа кривых 2) могут использоваться при постановке задачи оптимального проектирования ступенчатых аппаратов.

## Выводы по главе 2

1. Разработан барабанно-винтовой ступенчатый смеситель сыпучих материалов [134], позволяющий получать однородные смеси с малой концентрацией (порядка 0,1) компонентов, склонных к сегрегации по размерам и плотности частиц.

2. Разработана установка для исследования смесителя, а также бесконтактный способ исследования получаемой смеси [146], позволяющий определять её качество (однородность) в любом сечении смеси по длине корпуса смесителя.

3. Проведены экспериментальные исследования качества смеси, получаемой в ступенчатом барабанно-винтовом аппарате, на основании которых могут быть даны рекомендации по его конструированию, а именно, по выбору числа ступеней, параметров этих ступеней, параметров винтовых желобов смесителя.

### ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В БАРАБАННО-ВИНТОВОМ СМЕСИТЕЛЕ

Математические модели процессов смешивания в устройствах гравитационно-пересыпного действия в настоящее время чаще всего основаны на методе дискретных элементов (DEM), либо на уравнениях механики сплошной среды и физической кинетики [112, 121, 149-152]. В методе дискретных элементов моделирование ведется на уровне отдельных частиц среды, для которых записываются и решаются уравнения движения. Недостатками этого метода являются огромный объем вычислений и трудности с определением модели взаимодействия частиц, особенно если они имеют сложную геометрическую форму [121].

Подходы, основанные на уравнениях механики сплошной среды и физической кинетики, моделируют движение сыпучей среды на уровне физически бесконечно малых объемов, фактически содержащих большое число частиц, что делает их значительно менее затратными с вычислительной точки зрения, по сравнению с методами DEM. Последовательное применение этих подходов, однако, затруднено тем, что частицы сыпучей среды не находятся, в отличие от молекул жидкости, в состоянии интенсивного хаотического движения [112,152]. Это приводит к тому, что поля скоростей и концентраций компонентов зернистого материала могут существенно меняться на расстояниях, сравнимых с размерами одной частицы, что нарушает принцип плавного изменения полей, лежащий в основе механики сплошной среды. Кроме того, процессы переноса в сыпучих средах носят скорее не диссипативный, а конвективный характер, что препятствует их описанию с помощью стандартных кинетических уравнений диффузионного типа.

В связи с вышесказанным, интерес могут представлять полуэмпирические модели для вычисления полей концентраций компонентов смеси в рабочем объеме устройства. В таких моделях сохранение объема сыпучей массы обеспечивается уравнениями непрерывности, а потоки моделируются исходя из упрощенных

представлений о движении сыпучего материала, основанных на экспериментальных данных. Модель такого типа и предлагается в данной работе.

Для проведения расчетов по данной модели должны использоваться численные методы, применение которых в рассматриваемом случае оказывается непростой задачей из-за сложности геометрии рабочего объема устройства и характера движения потоков сыпучего материала. Для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, вытекающих из закона сохранения массы в микрообъеме сплошной среды, которая лежит в основе предложенной математической модели, в настоящее время развиты и широко применяются методы конечных разностей, конечных элементов и конечных объемов [153, 154]. Методы конечных разностей и конечных элементов обладают тем недостатком, что в них достаточно сложно обеспечить консервативность (точное соблюдение баланса потоков во всем моделируемом объеме), особенно на расчетных сетках с относительно крупным шагом. Метод конечных объемов обладает свойством консервативности при любой величине и форме ячеек, на которые разбивается рабочий объем устройства, поскольку основан на интегральной форме записи законов сохранения для каждой ячейки. Поток вещества между смежными ячейками вычисляется на их общих границах, так что объем материала, выходящий в единицу времени из одной ячейки, передается без изменения в другие. Указанное обстоятельство обусловило выбор метода конечных объемов для проведения численных расчетов.

### 3.1 Математическое моделирование процесса смешивания

В главе 2 [134, 140, 143] была разработана конструкция ступенчатого барабанно-винтового смесителя непрерывного действия, расчетная схема которого представлена на рисунке 3.1. Смеситель состоит из цилиндрических камер (ступеней смешивания) 1, 2 и 3, закрепленных коаксиально и вращающихся вокруг горизонтальной оси  $z$  с угловой скоростью  $\omega$ . Радиус  $i$ -ой ступени равен  $R^{(i)}$ , длина ступеней равна  $L$ . На внутренних поверхностях камер установлены

винтовые шнеки 4 (показан только шнек на 3-й ступени) с шагом  $b^{(i)}$ , которые обеспечивают движение сыпучей массы вдоль оси вращения со скоростями  $V_z^{(i)}$ . Загрузка компонентов смеси через дозаторы (на схеме не показаны), перегрузка их из одной ступени в другую и вывод готовой смеси в приемный бункер (на схеме не показан) производятся в зонах ширины  $l$ , прилегающих к основаниям ступеней. При вращении камер происходит циркуляция сыпучего материала в поперечном сечении смесителя (плоскость  $xy$ ) в режиме переката и одновременно смещение его вдоль оси смесителя.

Математическая модель процесса смешивания в данном устройстве подробно описана в работе [155, 156]. Изменение поля концентраций двухкомпонентной смеси, согласно этой модели, определяется уравнениями непрерывности

$$\frac{\partial c_k^{(i)}}{\partial t} = -\nabla \bar{J}_k^{(i)} + p_k^{(i)} + p_k^{(i,i-1)} - q_k^{(i)} - q_k^{(i,i+1)}, \quad (3.1 \text{ а})$$

$$\bar{J}_k^{(i)} = c_k^{(i)} \bar{V}^{(i)} + \bar{w}_k^{(i)}, \quad (3.1 \text{ б})$$

где  $c_k^{(i)}$  - объемная плотность, то есть доля микрообъема сыпучей смеси, занятая  $k$ -м компонентом смеси ( $k=1, 2$ ) в  $i$ -ой ступени смесителя ( $i=1, 2, 3$ );

$\bar{J}_k^{(i)}$  - суммарные плотности потоков компонентов;

$\bar{V}^{(i)}$  - поля скоростей сыпучей массы;

$\bar{w}_k^{(i)}$  - плотности потоков сегрегации;

$p_k^{(i)}$  и  $q_k^{(i)}$  - соответственно, потоки загрузки через дозаторы и выгрузки смеси в бункер;

$p_k^{(i,i-1)}$  - потоки загрузки в  $i$ -ю ступень из предшествующей;

$q_k^{(i,i+1)} = p_k^{(i+1,i)}$  - потоки выгрузки из  $i$ -ой ступени в последующую;

$t$  - время.

Отличные от нуля потоки  $p$  и  $q$  показаны на рисунке 3.1.

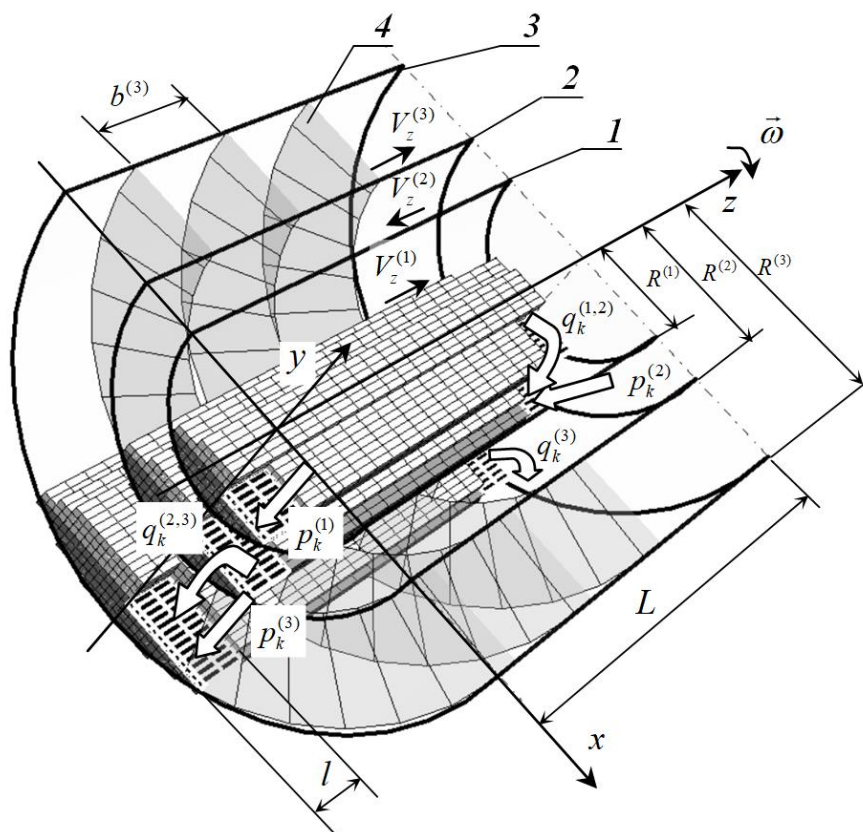


Рисунок 3.1 – Расчетная схема смесителя

Все поля и потоки являются функциями пространственных координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и времени. В установившемся режиме работы смесителя  $\partial c_k^{(i)} / \partial t = 0$  и зависимость полей от времени исчезает.

Скорости движения сыпучей массы вдоль оси смесителя  $V_z^{(i)}$  постоянны и определяются выражениями:

$$V_z^{(i)} = (-1)^{i+1} \frac{b^{(i)} \omega}{2\pi}. \quad (3.2)$$

В сечении, перпендикулярном оси вращения, движение сыпучего материала носит более сложный характер. Рассмотрим сечение  $i$ -ой ступени на рисунке 3.2.

При работе смесителя в режиме переката, когда выполняется условие  $\omega^2 R^{(i)} < g$ , где  $g$  - ускорение свободного падения, сечение, занятое сыпучей массой, разделяется на две зоны. В нижней, транспортирующей зоне, площадь

которой на рисунке 3.2 обозначена  $S_T^{(i)}$ , частицы материала поднимаются я вверх по линиям тока, совпадающим с дугами окружностей.

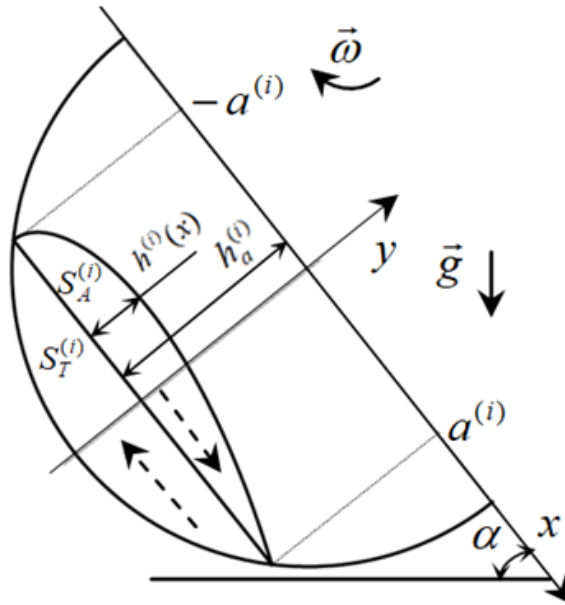


Рисунок 3.2 – Схема движения материала в сечении, перпендикулярном оси вращения

При этом частицы не переходят из одной линии тока в другую. Компоненты  $V_x^{(i)}$  и  $V_y^{(i)}$  поля скоростей частиц в этой зоне имеют простой вид:

$$V_x^{(i)} = \omega y, \quad V_y^{(i)} = -\omega x, \quad (3.3)$$

Если центр системы координат лежит на оси вращения рисунок 3.2. Достигнув некоторой линии, которую можно назвать линией обрушения, частицы попадают в верхнюю зону, зону обрушения с площадью  $S_A^{(i)}$ , где попадают в лавинообразный поток и скатываются вниз под действием силы тяжести, попадая в нижней части линии обрушения вновь в транспортирующую зону. Общее направление движения материала в каждой из зон указано на рисунке 3.2 пунктирными стрелками. Линии тока в зоне обрушения имеют значительно более сложную форму, чем в транспортирующей зоне. Кроме того, за счет некоторого разрежения потока может происходить переход частицы из одной линии тока в другую, что приводит, например, к появлению потоков сегрегации, если компоненты смеси различаются по физико-механическим свойствам. Расчет линии

обрушения и поля скоростей в зоне обрушения представляют собой сложную задачу. В работе [133] был предложен следующий приближенный метод ее решения. Будем считать, что линия обрушения совпадает с отрезком прямой, наклоненной к горизонту под углом обрушения сыпучего материала  $\alpha$ . В системе координат, в которой ось  $x$  наклонена к горизонту под таким же углом рисунок 3.2, уравнение линии обрушения имеет вид:

$$y = -h_a^{(i)}, \quad -a^{(i)} \leq x \leq a^{(i)}, \quad (3.4)$$

где  $h_a^{(i)} = \sqrt{(R^{(i)})^2 - (a^{(i)})^2}$ . При этом поверхность зоны обрушения задается уравнением

$$y = -h_a^{(i)} + h^{(i)}(x), \quad -a^{(i)} \leq x \leq a^{(i)}. \quad (3.5)$$

Полагая, что на линии обрушения имеет место тангенциальный разрыв скорости  $V_x^{(i)}$  и непосредственно над линией обрушения она обращается в ноль, что соответствует экспериментальным данным, можно в зоне обрушения представить  $V_x^{(i)}$  в виде;

$$V_x^{(i)} = v_0(x) \frac{y + h_a^{(i)}}{h^{(i)}(x)}, \quad (3.6)$$

где  $v_0(x)$  - скорость частиц на поверхности зоны обрушения. Если пренебречь силой трения, действующей на эти частицы, то для функции  $v_0(x)$  справедливо выражение, которое определяет скорость тела, свободно скользящего вдоль наклонной плоскости:

$$v_0(x) = \sqrt{2g \sin(\alpha)(x + a^{(i)})}. \quad (3.7)$$

Входящую в выражения (3.5)-(3.6) неизвестную функцию  $h^{(i)}(x)$  можно найти, исходя из закона сохранения потока сыпучей массы при ее переходе из транспортирующей зоны в зону обрушения:

$$\int_{-h_a^{(i)}}^{-h_a^{(i)} + h^{(i)}(x)} V_x^{(i)} dy = \int_{-a^{(i)}}^x (-\omega x') dx', \quad (3.8)$$

где  $V_x^{(i)}$  определяется формулой (3.6). Из уравнения (3.8) следует:

$$h^{(i)}(x) = \frac{\omega((a^{(i)})^2 - x^2)}{v_0(x)}. \quad (3.9)$$

Характерная форма поверхности обрушения, определяемая выражением (3.9) с учетом формулы (3.7), представлена на рисунке 3.2 и удовлетворительно согласуется с результатами экспериментов. Компоненту скорости  $V_y^{(i)}$  в зоне обрушения можно найти из уравнения непрерывности 3.9 а,

$$\frac{\partial}{\partial x} V_x^{(i)} + \frac{\partial}{\partial y} V_y^{(i)} = 0 \quad (3.9 \text{ а})$$

с учетом условия непрерывности нормальной составляющей скорости на линии обрушения. Выражение для  $V_y^{(i)}$  можно записать в виде:

$$V_y^{(i)} = -\frac{1}{2}(y + h_a^{(i)})^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_0(x)}{h^{(i)}(x)} \right) - \omega x. \quad (3.10)$$

Формулы (3.3)-(3.10) полностью определяют геометрическую форму транспортирующей зоны и зоны обрушения и поля скоростей  $V_y^{(i)}$  и  $V_x^{(i)}$  в этих зонах, если известна полудлина линии обрушения  $a^{(i)}$ . Для нахождения этого параметра необходимо воспользоваться законом сохранения объема сыпучей массы в виде:

$$S_T^{(i)} + S_A^{(i)} = \frac{1}{|V_z^{(i)}|} \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^n P_k^{(j)}, \quad (3.11)$$

где  $P_k^{(j)}$  – объем  $k$ -го компонента смеси, подаваемый через дозатор на  $j$ -ой ступени в единицу времени, а площади  $S_T^{(i)}$  и  $S_A^{(i)}$  определяются по формулам 3.11 а и 3.11 б:

$$S_T^{(i)} = (R^{(i)})^2 \arcsin \left( \frac{a^{(i)}}{R^{(i)}} \right) - a^{(i)} h_a^{(i)} \quad (3.11 \text{ а})$$

$$S_A^{(i)} = \int_{-a^{(i)}}^{a^{(i)}} h^{(i)}(x) dx. \quad (3.11 \text{ б})$$

Численное решение уравнения (3.11) позволяет найти параметр  $a^{(i)}$  для каждой ступени.

Если компоненты смеси существенно отличаются по плотности или размерам частиц, то в уравнении (3.1) нельзя пренебречь потоками  $\vec{w}_k^{(i)}$ , вызванными сегрегацией. Как показано в работе [134], нарушение равновесия смеси связано с тем, что сила тяжести  $F_g$ , действующая на частицу, и сила Архимеда  $F$ , возникающая в результате давления на частицу со стороны окружающих ее частиц, перестают уравновешивать друг друга. Пусть частица  $k$ -го компонента смеси с массовой плотностью  $\rho_k$  и размером  $d_k$  окружена частицами  $m$ -го компонента смеси с массовой плотностью  $\rho_m$  и размером  $d_m$ . Тогда отношение действующих на нее сил  $F/F_g \sim (\rho_k/\rho_m)(d_m/d_k)^2$ . Появление последнего множителя обусловлено тем, что в зернистой среде давление на частицу пропорционально числу ее контактов с окружением. Число контактов определяется величиной отношения  $(d_m/d_k)^2$ . Если частица окружена частицами разных компонентов, то для оценки отношения  $F/F_g$  вместо значения  $\rho_m/d_m^2$  для  $m$ -го компонента следует брать средневзвешенное по объему всех компонентов значение этого параметра. Исходя из приведенных оценок, а также учитывая, что движущей силой процесса сегрегации является гравитация, можно предложить следующее модельное представление для потоков  $\vec{w}_k^{(i)}$ , удовлетворяющее очевидному требованию  $\sum_{k=1}^n \vec{w}_k^{(i)} = 0$ :

$$\vec{w}_k^{(i)} = K_s \vec{g} \sqrt{R^{(i)} / g} c_k^{(i)} \left( 1 - \frac{\rho_k / d_k^2}{\sum_{m=1}^n c_m^{(i)} (\rho_m / d_m^2)} \sum_{m=1}^n c_m^{(i)} \right), \quad (3.12)$$

где  $K_s$  – безразмерный модельный параметр.

Выражение (3.12) применяется для расчетов в уравнении (3.1) только в зоне обрушения. В транспортирующей зоне  $\vec{w}_k^{(i)} = 0$ .

Для решения системы (3.1) необходимо указать выражения для потоков загрузки и выгрузки  $p$  и  $q$  рисунок 3.1. Будем считать, что смеситель работает в непрерывном режиме, производительность дозаторов остается постоянной, а загрузка и выгрузка материала не нарушает установившуюся структуру потоков внутри смесителя. Тогда целесообразно определить функции  $p$  и  $q$  таким образом, чтобы они были отличны от нуля только на нижней части линии обрушения, определяемой уравнением (3.4) при положительных значениях координаты  $x$ . Такой подход позволяет максимально упростить вид этих функций и обеспечивает такую «сшивку» потоков материала, которая обеспечивает наиболее плавное изменение поля концентраций. Выходя из зоны обрушения одной ступени, материал попадает в транспортирующую зону другой. Выражения для потоков выхода материала из 1-й ступени и перехода во 2-ю ступень  $q_k^{(1,2)}$ ,  $p_k^{(2,1)}$  имеют вид:

$$q_k^{(1,2)}(x, y, z) = \frac{|V_z^{(1)}|(S_T^{(1)} + S_A^{(1)})}{a^{(1)}l} c_k^{(1)}(x, y, z) \delta(y + h_a^{(1)}) \times \quad (3.13 \text{ а})$$

$$\times \eta(x, 0, a^{(1)}) \eta(z, L - l, L)$$

$$p_k^{(2,1)}(x, y, z) = \frac{|V_z^{(1)}|(S_T^{(1)} + S_A^{(1)})}{a^{(1)}l} c_k^{(1)}(x, -h_a^{(1)}, z) \delta(y + h_a^{(2)}) \times \quad (3.13 \text{ б})$$

$$\times \eta(x, 0, a^{(1)}) \eta(z, L - l, L)$$

где  $\delta(x)$  - дельта-функция Дирака, а функция  $\eta(x, a, b)$  определяется выражением

$$\eta(x, a, b) = \begin{cases} 1, & a < x < b \\ 0, & x \leq a, \quad x \geq b \end{cases} \quad (3.13 \text{ в})$$

Аналогично записываются выражения для потоков выхода из 2-й ступени и перехода в 3-ю  $q_k^{(2,3)}$ ,  $p_k^{(3,2)}$ :

$$q_k^{(2,3)}(x, y, z) = \frac{|V_z^{(2)}|(S_T^{(2)} + S_A^{(2)})}{a^{(2)}l} c_k^{(2)}(x, y, z) \delta(y + h_a^{(2)}) \times \\ \times \eta(x, 0, a^{(2)}) \eta(z, 0, l) \quad (3.14 \text{ а})$$

$$p_k^{(3,2)}(x, y, z) = \frac{|V_z^{(2)}|(S_T^{(2)} + S_A^{(2)})}{a^{(2)}l} c_k^{(2)}(x, -h_a^{(2)}, z) \delta(y + h_a^{(3)}) \times \\ \times \eta(x, 0, a^{(2)}) \eta(z, 0, l) \quad (3.14 \text{ б})$$

а также для потока выхода материала в бункер  $q_k^{(3)}$ :

$$q_k^{(3)}(x, y, z) = \frac{|V_z^{(3)}|(S_T^{(3)} + S_A^{(3)})}{a^{(3)}l} c_k^{(3)}(x, y, z) \delta(y + h_a^{(3)}) \times \\ \times \eta(x, 0, a^{(3)}) \eta(z, L - l, L) \quad (3.15)$$

Потоки загрузки смешиваемых компонентов через дозаторы  $p_k^{(i)}$  записываются аналогично (3.14), (3.15):

$$p_k^{(1)}(x, y, z) = P_k^{(1)} (la^{(1)} / n)^{-1} \delta(y + h_a^{(1)}) \times \\ \times \eta(x, a^{(1)}(k-1)/n, a^{(1)}k/n) \eta(z, 0, l) \quad (3.16 \text{ а})$$

$$p_k^{(2)}(x, y, z) = P_k^{(2)} (la^{(2)} / n)^{-1} \delta(y + h_a^{(2)}) \times \\ \times \eta(x, a^{(2)}(k-1)/n, a^{(2)}k/n) \eta(z, L - l, L) \quad (3.16 \text{ б})$$

$$p_k^{(3)}(x, y, z) = P_k^{(3)} (la^{(3)} / n)^{-1} \delta(y + h_a^{(3)}) \times \\ \times \eta(x, a^{(3)}(k-1)/n, a^{(3)}k/n) \eta(z, 0, l) \quad (3.16 \text{ в})$$

Согласно формулам (3.16), загрузка  $k$ -го компонента смеси в  $i$ -ю ступень проводится в отдельную зону на линии обрушения, определенную интервалом  $a^{(i)}(k-1)/n < x < a^{(i)}k/n$ . Это исключает смешивание компонентов до их попадания в устройство.

Выражения (3.1)-(3.16) представляют замкнутую математическую модель, которая, при известных конструктивных и режимных параметрах смесителя, позволяет найти поля  $c_k^{(i)}$  для компонентов с заданными физико-механическими свойствами.

### 3.2 Численное моделирование и сравнение результатов расчетов с данными эксперимента

Вычисления по модели (3.1)-(3.16) проводились методом конечных объемов [153-154, 157] с помощью пакета программ Mathematica приложение В следующим образом.

Сначала из уравнений (3.11) с применением стандартных численных методов интегрирования и нахождения корня нелинейного уравнения были определены значения  $a^{(i)}$  для каждой ступени. Тем самым геометрические формы областей, занятых сыпучим материалом, оказались полностью установленными.

Затем эти области были разделены на ячейки, имеющие форму прямоугольного параллелепипеда с длинами ребер  $\Delta x = 0.07R^{(1)}$ ,  $\Delta y = 0.07R^{(1)}$ ,  $\Delta z = 0.05L$  вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  соответственно. Ячейки транспортирующей зоны в каждой ступени представлены на рисунке 3.1 темно-серым цветом, зоны обрушения – светло-серым. Положение каждой ячейки определяется набором целочисленных индексов  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ , которые позволяют определить координаты ее центра по формулам 3.17:

$$x_c = -R^{(3)} + \Delta x(\bar{x} - 0.5), \quad (3.17 \text{ а})$$

$$y_c = -R^{(3)} + \Delta y(\bar{y} - 0.5), \quad (3.17 \text{ б})$$

$$z_c = \Delta z(\bar{z} - 0.5). \quad (3.17 \text{ в})$$

По значениям индексов легко найти, в какой ступени смесителя и в какой зоне движения материала находится ячейка. Время протекания процесса  $t$  также было заменено на дискретное целочисленное время  $\bar{t} = 0, 1, \dots$ . Соответствие между реальным и дискретным временем устанавливается формулой  $t = \bar{t} \cdot \Delta t$ . Максимально возможная величина шага дискретизации  $\Delta t$ , обеспечивающая сходимость метода, была подобрана экспериментально. Для принятых размеров ячеек она оказалась равной  $0,002 \cdot (2\pi/\omega)$ .

В методе конечных объемов предполагается, что значения всех искомым и известных полей в каждый момент времени не меняются в пределах ячейки и привязаны геометрически к ее центру. Пусть в области пространства, занимаемой ячейкой, не происходит загрузка или выгрузка материала. Тогда, интегрируя левую и правую части уравнения (3.1) по объему ячейки, можно получить закон сохранения объема сыпучей массы

$$\Delta x \Delta y \Delta z \frac{c[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t} + 1] - c[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}]}{\Delta t} = - \sum_{\sigma} \int_{S_{\sigma}} \vec{J}_{\sigma}[\bar{t}] \vec{n}_{\sigma} dS, \quad (3.18)$$

где  $\vec{J}_{\sigma}$  – потоки материала на гранях ячейки;

$\vec{n}_{\sigma}$  – внешняя нормаль к соответствующей грани, индекс  $\sigma$  пробегает по всем граням ячейки, интегрирование ведется по площади грани  $S_{\sigma}$ .

Индексы ступени  $i$  и компонента смеси  $k$  в этой и следующей формулах опущены с целью упрощения записи. Производная по времени в левой части представлена приближенно через конечную разность значений  $c$  в последующий и текущий моменты времени, что обусловлено использованием явной схемы расчета процесса по времени. Для замыкания схемы интегралы в правой части (3.18) должны выражаться через значения потоков и полей в центрах ячеек. В разных версиях метода конечных объемов применяются свои приближенные формулы для этих интегралов. Простейшим вариантом, обеспечивающим устойчивость вычислительной процедуры, является полностью противопоточное приближение первого порядка точности [153]. В рамках этого приближения перенос вещества на границе между двумя ячейками определяется значением величины  $\vec{J}$  в той из них, которая лежит выше по потоку, то есть ближе к предполагаемому «источнику». Рассмотрим, например, интеграл по грани ячейки, для которой внешняя нормаль  $\vec{n}_{\sigma}$  направлена по оси  $x$ . Эта грань является общей для ячеек с индексами  $[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}]$  и  $[\bar{x} + 1, \bar{y}, \bar{z}]$ . Выражение для проходящего через эту грань потока в рассматриваемом приближении будет иметь вид

$$\int_{S_{\sigma}} \vec{J}_{\sigma}[\bar{t}] \vec{n}_{\sigma} dS \approx \begin{cases} \Delta z \Delta y J_x[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}], & J_x[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}] > 0 \\ \Delta z \Delta y J_x[\bar{x} + 1, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}], & J_x[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}] \leq 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

где  $J_x$  – проекция вектора потока на ось  $x$ . Аналогично записываются выражения для потоков на остальных гранях.

В предлагаемой модели загрузка и выгрузка материала во всех ступенях смесителя осуществляется только через ячейки, расположенные в нижней части линии обрушения в зонах ширины  $l$ , прилегающих к основаниям ступеней. На рисунке 3.1 они показаны черным цветом и обведены полужирными белыми границами. Ячейки, относящиеся к зоне обрушения над ними, на изображении удалены. Для этих ячеек в правой части уравнения (3.18) появляются дополнительные слагаемые, связанные с потоками  $p$  и  $q$  (3.13)-(3.16). Выражения для потоков, поступающих через дозаторы, можно записать в виде:

$$p_k^{(i)}[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}] = 2P_k^{(i)} \frac{\Delta x \Delta z}{l a^{(i)}} \eta \left( x_c, \frac{a^{(i)}(k-1)}{2}, \frac{a^{(i)}k}{2} \right). \quad (3.20)$$

Потоки выгрузки материала  $q$  из текущей ступени и поток  $p$  передачи его в следующую ступень определяются формулами:

$$\begin{aligned} q_k^{(i,i+1)}[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}] &= p_k^{(i+1,i)}[\bar{x}, \bar{y}', \bar{z}, \bar{t}] = \\ &= \Delta x \Delta z \left| V_z^{(i)} \right| \frac{(S_T^{(i)} + S_A^{(i)})}{a^{(i)} l} c_k^{(i)}[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}], \end{aligned} \quad (3.21)$$

где  $i = 1, 2$ .

Индекс  $\bar{y}'$  указывает на ячейку, находящуюся на линии обрушения  $i+1$ -ой зоны, находящейся в ячейке на линии обрушения  $i$ -ой зоны и имеющей те же индексы  $\bar{x}$  и  $\bar{z}$ . Поток выгрузки материала в бункер определяется выражением:

$$q_k^{(3)}[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}] = \Delta x \Delta z \left| V_z^{(3)} \right| \frac{(S_T^{(3)} + S_A^{(3)})}{a^{(3)} l} c_k^{(3)}[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}]. \quad (3.22)$$

Следует учесть, что потоки  $p$  должны добавляться в правую часть (3.18) с положительным знаком, а потоки  $q$  - с отрицательным.

Задав начальные значения полей  $c_k^{(i)}[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t} = 0] = 0$ , по разностной схеме (3.18) с учетом выражений (3.19)-(3.22) можно с помощью обычной итерационной процедуры вычислить значения  $c_k^{(i)}[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}]$  в любой момент времени после

начала работы установки. Фактически вычисления были проведены для следующих значений параметров смесителя. Конструктивные параметры:  $R^{(1)}=0,07$  м,  $R^{(2)}=0,12$  м,  $R^{(3)}=0,18$  м,  $L=0,4$  м,  $l=0,04$  м,  $b^{(1)}=0,03$  м,  $b^{(2)}=0,035$  м,  $b^{(3)}=0,05$  м. Режимные параметры:  $\omega=3$  рад/с,  $P_1^{(1)}=P_2^{(1)}=1,5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с,  $P_1^{(2)}=P_1^{(3)}=0$ ,  $P_2^{(2)}=3 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с,  $P_2^{(3)}=6 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с. Физико-механические свойства смешиваемых компонентов: средние диаметры частиц (просо, манная крупа)  $d_1=0,225$  см,  $d_2=0,03$  см; насыпные плотности  $\rho_1=0,84$  г / см<sup>3</sup>,  $\rho_2=0,66$  г/см<sup>3</sup>. Коэффициент  $K_s$  в формуле (3.12) был принят равным 0,25. Для удобства сравнения результатов с данными экспериментов, для каждой ячейки вычислялась удельная объемная концентрация ключевого компонента (компонента 1) по формуле:

$$c^{(i)}[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}] = \frac{c_1^{(i)}[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}]}{c_1^{(i)}[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}] + c_2^{(i)}[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}]} \quad (3.23)$$

Производительность дозаторов была выбрана таким образом, чтобы средние удельные объемные концентрации ключевого компонента  $c_0^{(i)}$  в 1-й, 2-й и 3-й ступенях были равны, соответственно, 0,5, 0,25 и 0,125. Результаты численного моделирования показали, что к моменту времени  $t = 38 \cdot (2\pi / \omega)$ , что соответствует 38 полным оборотам смесителя, удельные концентрации стабилизировались во всех ступенях. Вычисленные значения установившихся удельных концентраций  $c^{(i)}[\bar{x}, \bar{y}]$  в поперечном сечении смесителя при  $z = L/2$  представлены на рисунке 3.3. Из рисунка видно, что концентрация ключевого компонента несколько повышается от центра сечения каждой ступени к периферии, что отражает влияние процесса сегрегации смеси из-за существенной разницы размеров частиц.

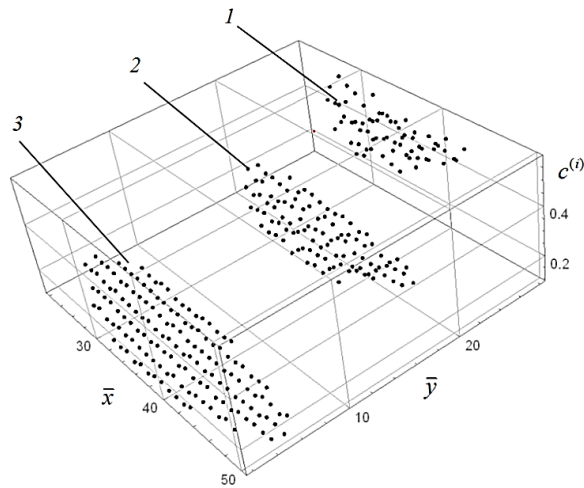


Рисунок 3.3 – Вычисленные значения установившихся удельных концентраций в поперечном сечении смесителя при  $z = L/2$ ; 1, 2, 3 – номера ступеней

Коэффициент неоднородности в поперечных сечениях каждой ступени смесителя вычислялся по формуле

$$V_C^{(i)}[\bar{z}] = \frac{1}{c_0^{(i)}} \sqrt{\frac{1}{N^{(i)}} \sum_{\bar{x}, \bar{y}} \left( c^{(i)}[\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}] - c_0^{(i)} \right)^2}, \quad (3.24)$$

где суммирование ведется по всем индексам ячеек  $\bar{x}, \bar{y}$ , находящихся в сечении  $i$ -ой ступени,

$N^{(i)}$  – количество этих ячеек.

Значения коэффициента неоднородности в сравнении с имеющимися данными натурального эксперимента [143, 147] приведены на рисунке 3.4.

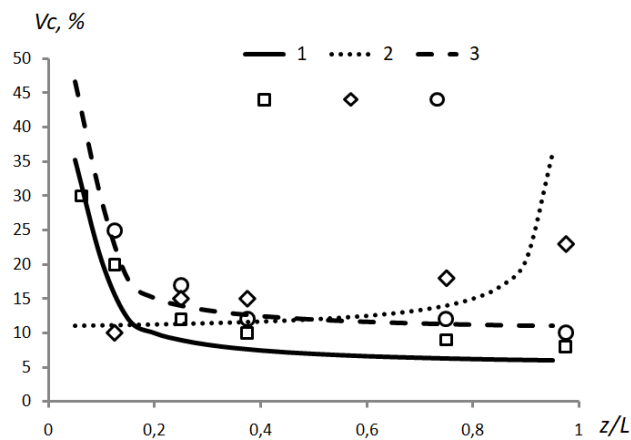


Рисунок 3.4 – Изменение коэффициента неоднородности смеси вдоль оси смесителя. Символы - эксперимент, линии – расчет по модели; 1, 2, 3 – номера ступеней

Из графиков видно, что коэффициент неоднородности возрастает вблизи зон загрузки компонентов, затем, по мере продвижения материала вдоль оси на расстоянии примерно равном 3 - 4 шагам винтового шнека быстро спадает, после чего качество смеси стабилизируется. Также рис. 3.4 демонстрирует качественное соответствие расчетных результатов с данными экспериментов.

### 3.3 Выводы по главе

1. Разработана математическая модель процесса смешивания сыпучих материалов в барабанно-винтовом ступенчатом смесителе. В основе модели лежит система уравнений непрерывности для концентраций компонентов смеси. Модель учитывает явление сегрегации смеси.

2. Описан алгоритм численного расчета процесса смешивания по предложенной математической модели. Расчет полей концентраций компонентов смеси выполнен методом конечных объемов с применением противопоточной разностной схемы первого порядка точности.

3. Проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, показавшее их удовлетворительное согласование.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА  
 БАРАБАННО-ВИНТОВОГО СТУПЕНЧАТОГО СМЕСИТЕЛЯ.  
 ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Экспериментальные исследования, представленные в главе 2, математическая модель процесса смешивания сыпучих материалов в новом барабанно-винтовом аппарате гравитационно-пересыпного действия [134] смесителе, изложенная в главе 3, рекомендации по расчету смесителей сыпучих материалов, описанные в литературе [2, 3, 158], методики расчета [6, 7] могут быть положены в основу метода его инженерного расчета. Расчетная схема смесителя показана на рисунке 4.1. Описание его работы приведено в главе 2.

Методика включает расчет технологических, конструктивных и энергетических параметров смесителя. К технологическим параметрам относится производительность, объем загрузки материала, время пребывания частиц материала в аппарате.

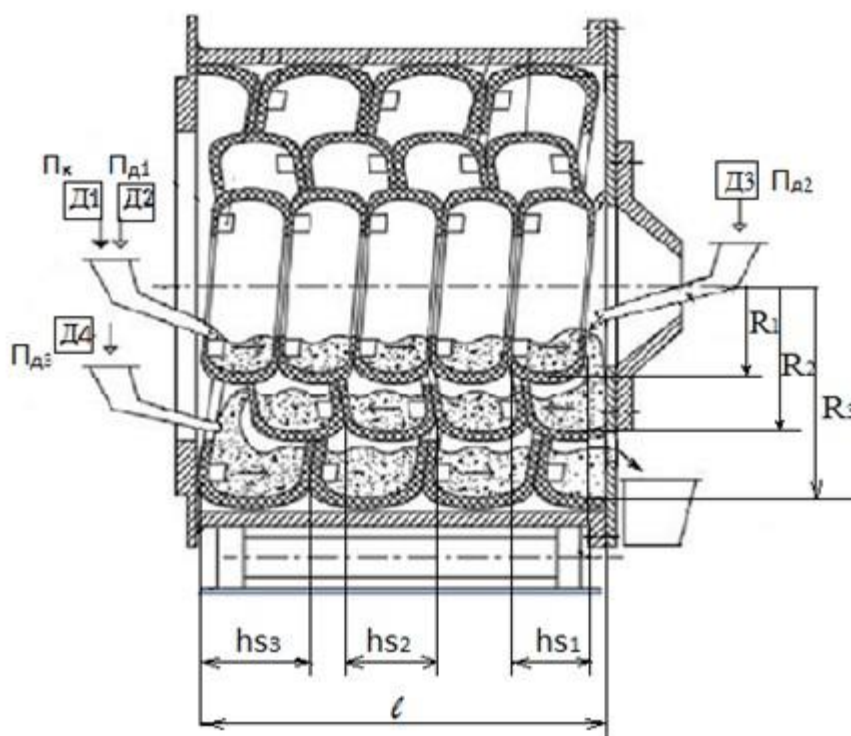


Рисунок 4.1 – Расчетная схема барабанно-винтового ступенчатого смесителя сыпучих материалов

Исходными данными к расчету являются:

1) Физико-механические характеристики смешиваемых компонентов смеси и её составе:

а) средние диаметры частиц смешиваемых компонентов  $d_1, d_2$  м ;

б) насыпные плотности сыпучих компонентов  $\rho_1, \rho_2$  кг/м<sup>3</sup> ;

в) углы обрушения  $\chi_{1,2}$  сыпучих фракций, входящих в смесь, град;

г) средняя объемная концентрация целевого (ключевого) компонента  $c_0$ .

2) Заданный коэффициент неоднородности  $[V_C]$  смеси, определяющий необходимое качество смеси.

3) Необходимая производительность смесителя (объемная или массовая)  $[П]$ , м<sup>3</sup>/час (кг/час).

На основании этих данных должны быть определены основные параметры смесителя.

#### 4.1 Расчет производительности смесителя и его основных конструктивных параметров

Сначала рассмотрим последовательность формирования целевой смеси на ступенях смесителя (см. рисунок 4.1). На первой ступени формируется смесь с концентрацией ключевого компонента  $c_0^{(1)}$ , подаваемая дозатором Д1 ключевого компонента и дозатором Д2 – транспортирующего компонента. Производительности дозаторов –  $П_k$  и  $П_{д1}$  соответственно. На второй ступени формируется состав с концентрацией ключевого компонента  $c_0^{(2)}$  из смеси, полученной на ступени 1 и транспортирующего компонента, подаваемого третьим дозатором Д3 производительностью  $П_{д2}$ . На третьей ступени формируется целевой состав с концентрацией ключевого компонента  $c_0^{(3)} = c_0$  из смеси, полученной на ступени 2 и транспортирующего компонента, подаваемого четвертым дозатором Д4 производительностью  $П_{д3}$ . Концентрации ключевого компонента на ступенях 1

и 2 выбираются с учетом условия  $1 > c_0^{(1)} > c_0^{(2)} > c_0$  таким образом, чтобы обеспечить наилучшее качество смеси.

Расчет производительности дозаторов и смесителя будем осуществлять на основании схемы, представленной на рисунке 4.2.

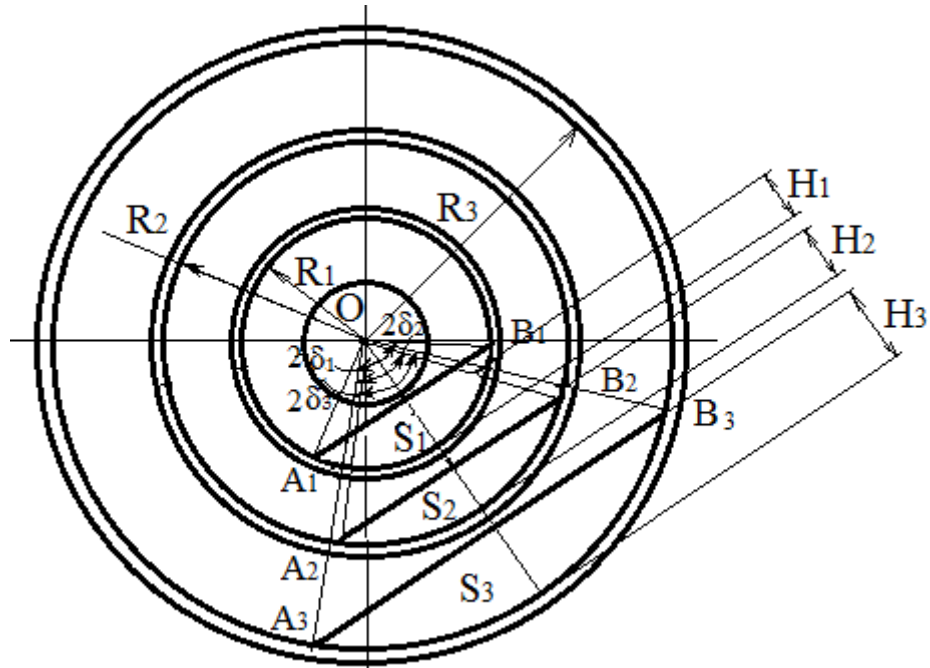


Рисунок 4.2 – Схема к расчету производительности смесителя и дозаторов

Поток материала  $W_i$ , м<sup>3</sup>/ч, проходящий через  $i$ -ю ступень смесителя ( $i=1, 2,$

3) можно представить в виде:

$$W_i = k_i S_i v_i, \quad (4.1 \text{ а})$$

$$S_i = R_i^2 \delta_i - R_i (R_i - H_i) \sin(\delta_i), \quad (4.1 \text{ б})$$

$$v_i = 60n(h_{Si} - \Delta), \quad (4.1 \text{ в})$$

$$\delta_i = \arccos((R_i - H_i)/R_i), \quad (4.1 \text{ г})$$

где  $S_i$ , м<sup>2</sup> – площадь сегмента поперечного сечения ступени, занятого материалом;

$v_i$ , м/час – скорость движения материала вдоль оси вращения;

$\delta_i$ , рад – половина центрального угла сегмента;

$R_i$ , м – радиус ступени;

$H_i$ , м – высота борта желоба;

$h_{Si}$ , м – шаг винтового желоба;

$\Delta$ , м – толщина борта желоба;

$n$ , об/мин – скорость вращения ступеней смесителя;

$k_i$  – безразмерный коэффициент, который вводится для предотвращения контакта материала с наружной поверхностью предыдущей ступени смесителя.

В расчетах принимались следующие числовые значения этих коэффициентов:  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = k_3 = 0.95$ .

Примечание. Здесь и далее при расчетах пренебрегаем изменением размеров за счет наклона камеры 3 (рисунок 4.1, 4.2) к вертикальной плоскости ( $\sim 10-12^\circ$ ), что, вообще говоря, приводит к изменению линейных размеров на 2-2,3%.

Условия сохранения потоков ключевого и транспортирующего компонентов в ступенях смесителя можно представить в виде:

$$\begin{aligned} P_k &= c_0^{(1)}W_1, & P_{Д1} &= (1 - c_0^{(1)})W_1, \\ 0 &= c_0^{(2)}W_2 - c_0^{(1)}W_1, & P_{Д2} &= (1 - c_0^{(2)})W_2 - (1 - c_0^{(1)})W_1, \\ 0 &= c_0W_3 - c_0^{(2)}W_2, & P_{Д3} &= (1 - c_0)W_3 - (1 - c_0^{(2)})W_2, & [II] &= W_3, \end{aligned} \quad (4.2)$$

где  $P_k$ ,  $P_{Д1}$ ,  $P_{Д2}$ ,  $P_{Д3}$ , м<sup>3</sup>/ч, - производительности дозаторов Д1, Д2, Д3, Д4 соответственно.

Из соотношений (4.2) следуют уравнения для потоков  $W_i$ :

$$W_1 = \frac{c_0}{c_0^{(1)}}[II], \quad W_2 = \frac{c_0}{c_0^{(2)}}[II], \quad W_3 = [II] \quad (4.3)$$

Из конструктивных соображений можно принять, что размеры  $H_i, h_{Si}$  пропорциональны величине  $R_i$ :

$$H_i = (0,25 - 0,27)R_i, \quad h_{Si} = (0,2 - 0,24)R_i \quad (4.4)$$

Тогда процедура численного решения уравнений (4.3) с учетом выражений (4.1) позволяет, отталкиваясь от некоторых предварительно заданных начальных

значений радиусов ступеней  $R_i$ , найти их точные значения. Из системы (4.2) также следуют формулы для вычисления производительностей дозаторов:

$$\begin{aligned} P_k &= c_0[II], & P_{Д1} &= (1 - c_0^{(1)}) \frac{c_0}{c_0^{(1)}} [II], \\ P_{Д2} &= \frac{c_0(c_0^{(1)} - c_0^{(2)})}{c_0^{(1)} c_0^{(2)}} [II], & P_{Д3} &= \frac{(c_0^{(2)} - c_0)}{c_0^{(2)}} [II]. \end{aligned} \quad (4.5)$$

На рисунке 4.3 показана блок-схема расчета конструктивных и технологических параметров барабанно-винтового ступенчатого смесителя [134].

#### Расчёт длины корпуса ступенчатого смесителя

Длина рабочей части ступеней смесителя  $l$ , определяется заданным (целевым) коэффициентом неоднородности  $[Vc]$  получаемой смеси, параметрами системы смеситель - смешиваемые компоненты. Расчет коэффициента неоднородности  $Vc$  смеси осуществляется в соответствии с математической моделью процесса смешивания [155, 156] в аппарате, описание которой приведено в главе 3. На основе этой модели разработана программа расчета процесса смешивания.

#### Расчет мощности привода смесителя

Мощность привода включает мощность, расходуемую на преодоление трения качения и скольжения  $N_{mp}$ , мощность, которая связана с циркуляцией смеси  $N_{ц.м.}$  и – с воздействием на нее лопастей –  $N_{лоп.} = N_{сл}^{\tau} + N_{сл}^{oc}$ :

$$N = N_{mp} + N_{ц.м.} + N_{сл}^{\tau} + N_{сл}^{oc}. \quad (4.6)$$

а) Расчет мощностей, расходуемых на преодоление трения качения и скольжения, в соответствии с [3, 158] определяются формулой:

$$N_{mp} = \frac{G_M + G_{кор}}{d_{рол} \cos \psi} \left( \delta_K (D_B + d_{рол}) + f D_B \frac{d_{рол}}{2} \right) \omega, \quad (4.7)$$

где  $G_m, G_{кор}$  – силы тяжести, действующие на материал и на корпус смесителя, соответственно,

$d_{рол}$  – диаметр опорного ролика,

$D_B$  – наружный диаметр барабана,

$\psi$  – угол между реакцией ролика и вертикалью,

$\delta_k$  – коэффициент трения качения корпуса по опорному ролику,

$f$  – коэффициент трения в подшипнике ролика,

$\omega$  – угловая скорость корпуса смесителя.

б) Часть мощности, затрачиваемой на циркуляцию смеси (без учета влияния лопастей), определяется в соответствии с методикой, описанной в работах [6, 7].

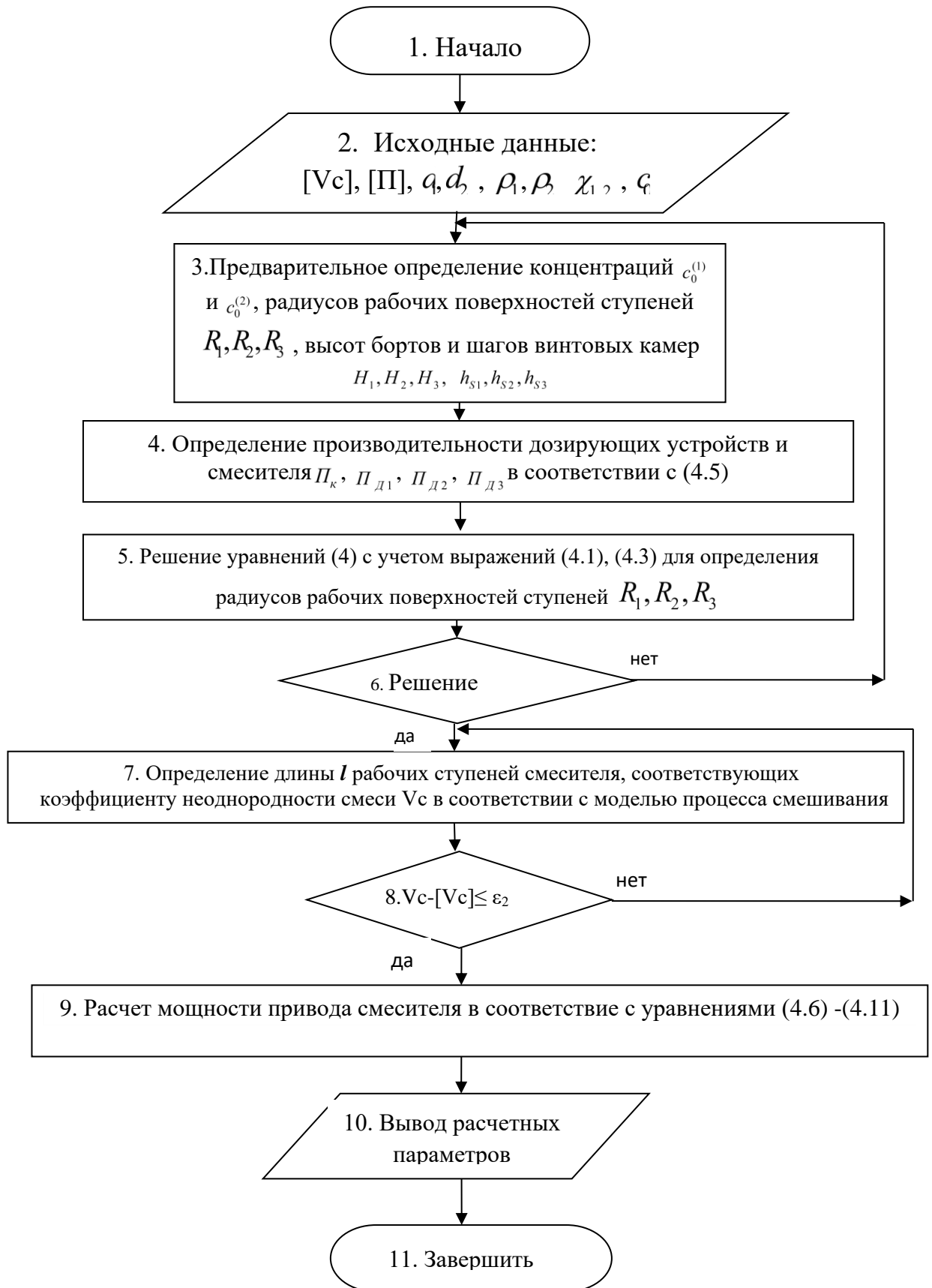


Рисунок 4.3 – Блок-схема расчета барабанно-винтового ступенчатого смесителя

Методика основана на исследованиях движения компонентов, в результате которых, получают уравнение, определяющее форму свободной поверхности перерабатываемого материала. Для трехступенчатого аппарата:

$$N_u = \rho g l \omega \sum_i \frac{S_{об\ i} \Delta h_{Ci}}{\arctg(x_{ci}/y_{ci})} \quad (4.8)$$

где  $S_{об\ i}$  - площадь поперечного сечения области обрушения при движении сыпучего материала на  $i$  - ой ступени;

$\Delta h_{Ci}$  – изменение координаты центра масс области обрушения смеси при её движении на  $i$ -ой ступени в направлении силы тяжести, относительно центра её масс  $C$  в покое;

$x_{ci}, y_{ci}$  – координаты центра масс области обрушения на  $i$  -ой ступени смесителя.

в) При расчете мощности силы сопротивления, действующей на лопасти при их движении внутри сыпучего материала, как и в [7], предполагалось, что эта сила пропорциональна первой степени скорости лопасти относительно частиц материала, тогда тангенциальная составляющая  $N_{cl}^r$ :

$$N_{cl}^r = k_1 \omega^2 \cos \alpha \sum_i n_i k_{2i} R_{li}^2 b_i H_i, \quad (4.9)$$

где  $k_1$  – коэффициент сопротивления;

$n_i$  – число лопастей  $i$ -ой ступени;

$\alpha_{li}$  – угол наклона лопасти  $i$ -ой ступени к плоскости поперечного сечения материала;

$b_i, H_i, R_{li}^2$  – ширина, высота и радиус установки лопастей  $i$ -ой ступени;

$k_{2i} = \delta_i / \pi$  – коэффициент загрузки лопасти  $i$ -ой ступени,  $\delta_i$  – центральный угол сегмента сыпучего материала на  $i$ -ой ступени.

г) Аналогично (4.9), выражение для расчета мощности, затрачиваемой на осевое перемещение смеси лопастями, имеет вид:

$$N_{ca}^{oc} = k_1 \omega^2 \sin \alpha_n \sum_i n_i k_{2i} R_{ni}^2 b_i H_i, \quad (4.10)$$

где из (4.9) и (4.10):

$$k_1 = \frac{S_{2обр} b \rho g \Delta h_2}{n k_2 \omega R_n^2 S \cos \alpha_n \operatorname{arctg}(x_{c2}/y_{c2})}. \quad (4.11)$$

#### 4.2 Применение ступенчатого барабанно-винтового смесителя в агрегате десульфуризации дымовых газов

В данном разделе разрабатывается технология десульфуризации дымовых газов, которые оказывают негативное влияние на здоровье человека и окружающую среду, наносят ущерб зданиям и сооружениям. Агрегат и технология очистки дымовых газов от оксида серы разработаны на основе использования эффективного смесительного устройства со ступенчатым исполнением корпуса для приготовления составов с малыми добавками гашеной извести.

В связи с резким увеличением стоимости углеводородного топлива, неочевидными перспективами «зелёной» энергетики, связанными с её зависимостью от природных условий, становится актуальной задача получения электроэнергии на тепловых электростанциях (ТЭС), использующих уголь в качестве топлива.

Однако, увеличение объемов расходуемого угля на ТЭС, в свою очередь, сопровождается и существенным ростом объёмов выбросов летучей золы и вредных дымовых отходов, содержащих оксиды серы и азота [159].

По данным информационно-технического справочника (ИТС НДТ 38-2017) [160], в котором содержится анализ наиболее эффективных производственных технологий за последние 25 лет, непрерывно растут, удельные выбросы загрязняющих веществ из угольных ТЭС. Причем выбросы оксидов серы превышают выбросы золы и оксидов азота, и динамика их снижения в 1,8 раза уступает динамике снижения выбросов золы.

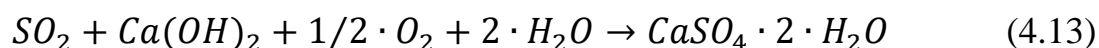
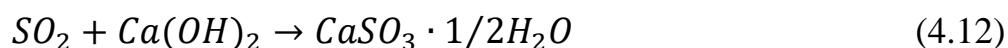
Оксид серы ( $\text{SO}_2$ ), генерируемый при сжигании угля, является активным загрязнителем окружающей среды. Поскольку плотность газа  $\text{SO}_2$  примерно в 2,5 раза больше плотности воздуха, при его выбросах происходит интенсивное гравитационное осаждение. При этом оксид серы может находиться в воздухе до 3-х суток, и осаждаться на растительность, здания, почву. При этом, до 90% выбросов  $\text{SO}_2$  осаждаются в радиусе 15 -35 высот дымовых труб. В результате взаимодействия с влагой возникают кислотные осадки, приводящие к закислению водоёмов и рек, гибели водной флоры и фауны. Оставшиеся 10 % оксида серы под действием ветровых потоков могут переноситься на значительные расстояния и оказывать перечисленные негативные воздействия на окружающую среду и человека. Таким образом, очистка дымовых газов от оксида серы является не только локальной, но и глобальной проблемой.

Для решения задачи очистки дымовых газов от оксида серы, за последние 20-30 лет, технологии сжигания угля были существенно усовершенствованы. Благодаря развитию природоохранных технологий, сейчас возможно эффективно очищать дымовые газы от вредных (загрязняющих) выбросов. Тем не менее, необходимая степень сероочистки не всегда достигается, так как она зависит от ряда факторов: от свойств угля и тепловой мощности котла, от принятого норматива объёма выброса дымов ( $\text{SO}_2$ ) и, безусловно, от эффективности отдельных технологических стадий процесса десульфуризации.

Здесь предлагается сравнительно недорогая и простая по реализации технология десульфуризации дымовых газов. Она схематично представлена на рисунке 1. Технология проводится с использованием следующего оборудования: 1 – электрофильтр; 2 – система пылеудаления; 3 – смеситель; 4 – увлажнитель; 5 – система утилизации пылевого остатка.

Приведём краткое описание технологии реализации процесса десульфуризации дымовых газов схемы. Дымовые газы после угольного котла направляются в газоход, откуда попадают в электрофильтр 1, где происходит электростатическое осаждение частиц золы (пыли). Далее зола поступает в бункер (не показан), разделяется на потоки. Затем, с помощью дозаторов, потоки

поступают на соответствующие ступени барабанно-винтового смесителя 3 [134], где происходит смешивание потоков золы с гашеной известью. Из смесителя 3 однородная смесь поступает в увлажнитель 4, откуда подается в восходящий газоход, где происходит процесс десульфуризации. Излишки смеси удаляются и утилизируются системой 2, 5. При поглощении диоксида серы известковой смесью протекают химические реакции по формулам 4.12 и 4.13 с образованием сульфита и сульфата кальция.



На выходе получают пылегипсовую смесь.

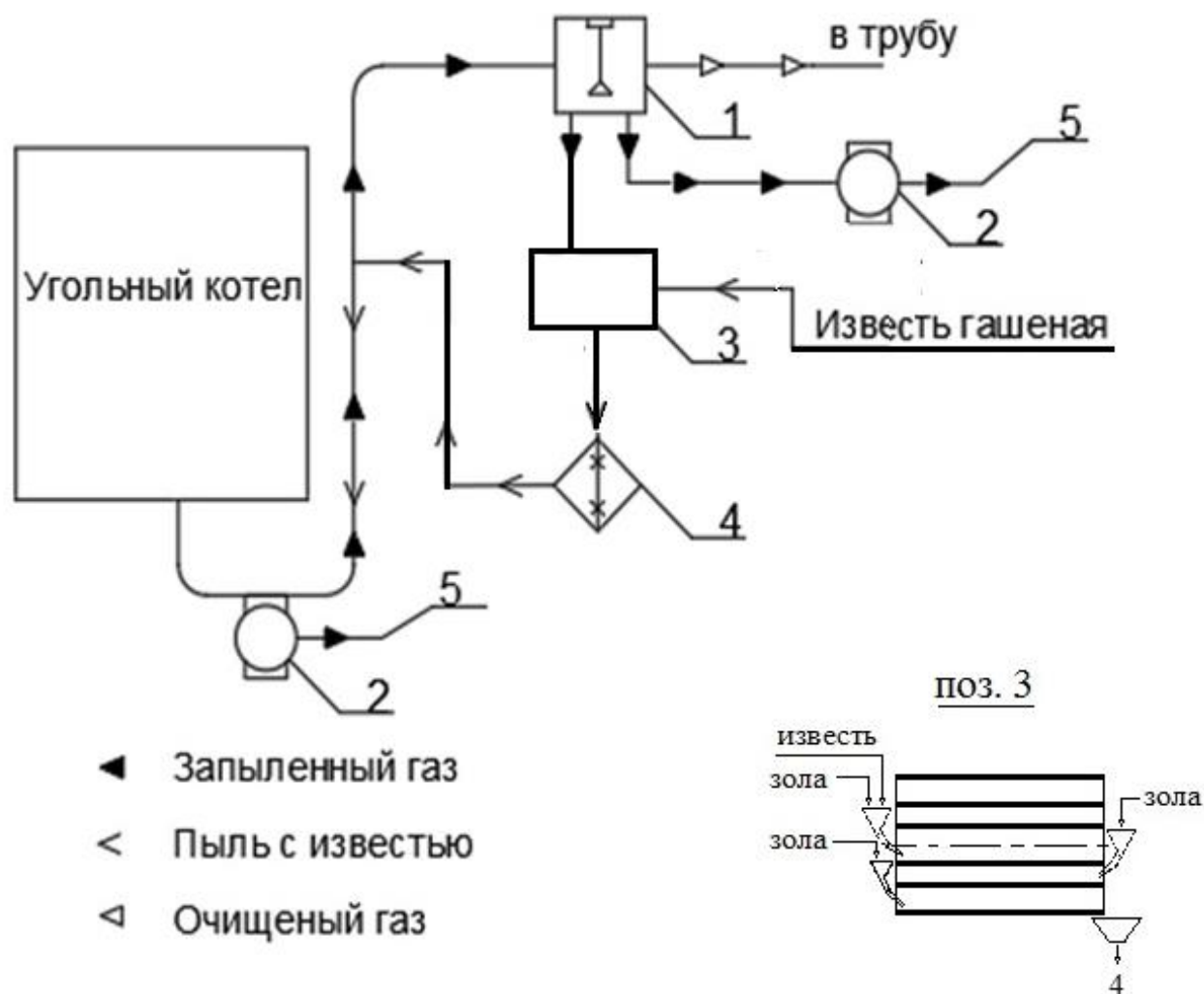


Рисунок. 4.4 – Технология реализации процесса десульфуризации

ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Эффективность работы данной технологической схемы, с одной стороны, определяется качеством фильтрации, а с другой – однородностью получаемой смеси твердых частиц угля и гашеной извести. Уровень коэффициента полезного действия фильтрования определяет состав газовой смеси, поступающей в трубу, а однородность смеси золы с углем определяет качество процесса дегазации. В работах [161-162] предприняты шаги по совершенствованию стадии фильтрации за счет комбинирования электрического и рукавного фильтров [163]. Вторая задача в данной технологической схеме десульфуризации твердой части дымовых отходов решается за счет применения ступенчатого смесителя сыпучих материалов [134], представленного на рисунке 2.1, а также схематично – на рисунке 4.4 поз. 3. Эта задача состоит в предварительной подготовке однородной смеси непосредственно к десульфуризации. Дадим краткое описание работы ступенчатого смесителя 3, и его влияния на эффективность технологии десульфуризации.

Смешиваемые компоненты (зола - известь) дозируются в соотношении 1:1 и, через патрубок загрузки 6 и отверстие в крышке 10, поступают на ступень 1 во внутреннюю рабочую камеру. Подача компонентов осуществляется во вращающийся желоб (ступень 1) после включения привода 12. Соотношение объемов компонентов 1:1, соответствует максимальной скорости протекания процесса смешивания [31]. Смесь компонентов (зола – известь), находящаяся на ступени 1, движется в режиме переката. Происходит постоянный подъем и обрушение компонентов, что определяет их циркуляцию и смешивание. Смешивание компонентов золы с известью происходит преимущественно в потоке обрушения материала. Дополнительное перемешивающее воздействие на смесь оказывают лопасти 5, отогнутые поочередно в противоположных направлениях. Таким образом, лопасти поочередно проталкивают смесь вдоль оси смесителя и возвращают её. При этом обеспечивается однонаправленное перемещение компонентов вдоль оси смесителя.

Сыпучая смесь перемещается вдоль оси корпуса внутри ступени 1, образующей винтовой желоб, пересыпается на ступень 2. Из патрубка 7 на поверхность смеси осуществляется дополнительная загрузка золы в равном

соотношении объемов золы и смеси, образованной на ступени 1. При этом достигаются наилучшие условия смешивания на участке ступени 2. Механизмы процессов смешивания на ступенях 1 и 2 аналогичны. На участке 2 компоненты перемещаются вдоль оси корпуса в противоположном направлении относительно направления на участке 1 и поступают в винтовой желоб на ступень 3. Затем из патрубка 8 в смесь снова добавляется зола в соотношении 1:1 со смесью, полученной на ступени 2, и процесс смешивания повторяется. Готовая смесь из винтового желоба участка 3 поступает в приемный бункер 9. Таким образом, концентрации извести на участках смешивания 1, 2 и 3 составляют 0,5; 0,25 и 0,125, соответственно. При использовании четвертой ступени возможно получение смеси с концентрацией извести, равной 0,0625.

В заключение необходимо отметить, что ступенчатое коаксиальное расположение рабочих камер корпуса смесителя [134] в сочетании с установкой дополнительных патрубков подачи золы между ступенями позволяет улучшить условия смешивания при получении смеси золы с малыми добавками гашеной извести. Это, в конечном счете, определяет рост эффективности процесса десульфуризации твердой части дымовых выбросов за счет увеличения площади поверхности взаимодействующих фаз.

Необходимо отметить, что повышение эффективности процесса десульфуризации в данной технологической схеме обеспечивается за счет формирования развитой поверхности контакта реагирующих фаз (твердых частиц золы и извести). Максимальная площадь поверхности контакта соответствует так называемой идеальной смеси. Однако для смеси, однородность которой соответствует коэффициенту неоднородности порядка  $V_c \approx 10\%$  показатели эффективности процесса (содержание прореагировавшего сульфида серы) резко возрастают.

### 4.3 Выводы по главе 4

1. Разработана инженерная методика расчета конструктивных, технологических и энергетических параметров нового барабанно-винтового ступенчатого смесителя сыпучих материалов. Предложена блок-схема расчета смесителя.

2. Предложен современный вариант использования барабанно-винтового ступенчатого смесителя в агрегате, реализующем технологию десульфуризации дымовых газов.

3. Эффективность агрегата определяется применением в нем ступенчатого смесителя сыпучих материалов [134]. При этом достигаются наилучшие условия смешивания, повышается поверхность контакта реагирующих компонентов. Рост эффективности процесса десульфуризации обеспечивается за счет формирования развитой поверхности контакта реагирующих фаз (твердых частиц золы и извести). Разработанный смеситель может быть использован в топливно-энергетической отрасли для очистки дымовых газов от угольной пыли (Приложение Г), а также в ряде других отраслей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана конструкция барабанно-винтового ступенчатого смесителя защищенная патентом РФ (пат. № 2812190).

2. Разработан способ исследования качества сыпучей смеси, защищенный патентом РФ позволяющий определять значения критерия однородности в сечениях смеси вдоль оси корпуса смесителя.

3. Проведены экспериментальные исследования влияния основных параметров нового смесителя на качество получаемых сыпучих составов. Установлено преимущество трехступенчатого аппарата перед одноступенчатым смесителем при получении смесей с соотношением компонентов 1:1-1:11.

4. Разработана математическая модель процесса смешивания сыпучего материала в барабанно-винтовом ступенчатом аппарате, позволяющая найти поля концентраций компонентов смеси в объеме аппарата.

5. На основе предложенной модели разработана программа расчета коэффициента неоднородности получаемой смеси. Установлена хорошая сходимость результатов расчета с данными эксперимента.

6. На основе теоретических и экспериментальных исследований процесса смешивания сыпучих материалов, результатов численного моделирования, разработана инженерная методика расчета конструктивных и технологических параметров нового смесителя.

7. Разработанный смеситель и программное обеспечение для расчета коэффициента неоднородности смеси предлагается использовать в агрегате для десульфуризации дымовых газов в АО Кондор-Эко (Ярославская область).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Макаров, Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов/ Ю.И. Макаров. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
2. Першин, В.Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа/ В.Ф. Першин, В.Г. Однолько, С.В. Першина – М.: Машиностроение, 2009. – 220 с.
3. Гусев, Ю.И. Конструирование и расчет машин химических производств / под ред. Э.Э. Кольмана – Иванова. – М.: Машиностроение, 1985. – 408 с.
4. Пат. 2254907 Российская Федерация, В01F3/18. Способ приготовления смеси сыпучих материалов/ М.Ю. Таршис, А.И. Зайцев, Л.В. Королев; заявитель и патентообладатель ЯГТУ.- № 2003129737/15; заявл.06.10.03; опубл. 27.06.05, Бюл. №18. – 5 с.
5. Королев, Л.В. Моделирование процесса приготовления плотных сыпучих смесей в новом ленточном устройстве гравитационно-пересыпного действия: дис. канд. техн. наук. – 05.17.08. – Ярославль, 2009. – 136 с.
6. Волков, М.В. Метод расчета процесса смешивания сыпучих материалов в новом аппарате в устройстве с открытой рабочей камерой: дис. ... канд. техн. наук. - 05.17.08. – Ярославль, 2014. – 137 с.
7. Черпицкий, С.Н. Исследование и расчет процесса смешивания сыпучих материалов в барабанно – лопастном устройстве дис. канд. техн. наук. – 2.6.13. – Ярославль, 2022. – 137 с.
8. Пат. 2478420 Российская Федерация, МПК В01F13/18. Способ непрерывного приготовления многокомпонентных смесей и устройство для его реализации/ Ю. Т. Селиванов, В. Ф. Першин, А. С. Дурнев; заявитель и патентообладатель Тамбовский государственный технический университет (RU).- №2011131090/05, заявл. 25.07.2011; опубл. 10.04.13, бюл. №32. – 4 с.: ил.
9. Пат. 2755685 Российская Федерация, МПК В01F9/08. Смеситель сыпучих материалов/ А.П. Мудров, Г.В. Пикмуллин; заявитель и патентообладатель

«Казанский государственный аграрный университет». – 2020127628, заявл. 18.08.2020; опубл. 20.09.2021, бюл. № 26. – 4 с.: ил.

10. Пат. 2456155 Российская Федерация, МПК 28С5/20.Бетоносмеситель/ Белокур К.А., Серга Г.В.; заявитель и патентообладатель «Кубанский государственный аграрный университет». – 2020127628, , заявл. 10.02.2011; опубл. 20.07.2012, бюл. № 20. – 4 с.: ил.

11. Пат. 2471540 Российская Федерация. Смеситель сыпучих материалов/ М.Ю. Таршис, А.И. Зайцев, Л.В. Королев, М.В. Волков; заявитель и патентообладатель Ярославский государственный технический университет (RU). – №2012126908/05, заявл. 27.06.2012; опубл. 10.01.13, Бюл. № 1. – 4 с.: ил.

12. Пат. 2188124 Российская федерация, МПК В28С5/36, В01F3/18. Смеситель /Б.А. Миронов, А.И. Зайцев, А.А. Мурашов, И.А. Зайцев, Л.В. Королев, М.Ю. Таршис, Д.О. Бытев; заявитель и патентообладатель Ярославский государственный технический университет (RU). – №200103918/12, заявл. 12.02.2001; опубл. 27.08.02, бюл. №24. – 4 с.: ил.

13. Пат. 2191622 Российская федерация, МПК В01F3/18, Смеситель / М.Ю. Таршис, А.И. Зайцев, Л.В. Королев, Д.О. Бытев, И.А. Зайцев; заявитель и патентообладатель Ярославский государственный технический университет (RU).- №2011128178/05, заявл. 05.02.2001; опубл. 27.10.02, бюл. №30. – 4 с.: ил.

14. Пат. №2466778 Российская Федерация, МПК В01F9/06. Смеситель/ М. Ю. Таршис, А.И. Зайцев, Л.В. Королев, М.В. Волков; заявитель и патентообладатель Ярославский государственный технический университет (RU). – №2011128178/05, заявл. 07.07.2011; опубл. 20.11.12, бюл. №32. – 4 с.: ил.

15. Пат. №118565 U1 Российская Федерация, МПК В01F 9/06 / В.Е. Мизонов, С.В. Крупин, К.А. Шелатонова; заявитель и патентообладатель Иванов. гос. энергет. ун-т им. В.И. Ленина. – № 2012113252/05; заявл. 03.04.2012 ; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21. – 2 с. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU118565U1/en> (дата обращения: 05.06.2023).

16. Пат. № 2522645 Российская федерация, МПК В01F9/00, Устройство для смешения сыпучих материалов / А.И. Зайцев, А.Е. Лебедев, А.Б. Капранова,

- А.И. Чадаев, Г.И. Зеленый; заявитель и патентообладатель «Ярославский государственный технический университет» (RU). – №2013107640/05, заявл. 20.02.2013; опубл. 20.07.14, бюл. №20. – 4 с.: ил.
17. Пат. № 2626203 Российская Федерация, МПК В01F 9/02, МПК В01F 3/18.
18. Смеситель / Таршис М.Ю., Черпицкий С.Н., Королев Л.В., Зайцев А.И. – опубл.: 24.07.2017. Бюл. № 21.
18. Пат. № 2618065 Российская Федерация. Смеситель сыпучих материалов / Таршис М.Ю. Черпицкий С.Н., Королев Л.В., Зайцев А.И. – опубл.: 02.05.2017, Бюл. № 13.
19. Пат. № 729260 Российская Федерация, МПК В01F 9/02, Устройство для смешивания и обработки / Дьюпевог У.А., Хауген А., Марвик У. Й., Саннес К. – опубл.: 05.08.2020. Бюл. № 22.
20. Пат. № 2822493 Российская Федерация, В01F29/60. Барабанный смеситель / Д.В. Сухоруков, С.С. Комаров, Д.М. Бородулин, Н.В. Кузьмина, А.П. Воронюк; заявитель и патентообладатель «Кемеровский государственный университет». – № 2023111273 заявл.02.05.23; опубл. 08.07.2024, Бюл. №19. – 5 с.
21. Пат. № 2643962 Российская Федерация, В01F29/60. Барабанный смеситель / Д.В. Сухоруков, С.С. Комаров, Д.М. Бородулин, Н.В. Кузьмина, А.П. Воронюк; заявитель и патентообладатель «Кемеровский государственный университет».- № 2023111273 заявл.02.05.23; опубл. 08.07.2024, Бюл. №19. – 5 с.
22. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов. / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, С.Ю. Арутюнов // М.: Наука, 1985. – 440 с.
23. Процесс смешивания сыпучих материалов. Основные понятия и методы исследования/ М.Ю. Таршис, Л.В. Королев, И.С. Шеронина, А.Б. Капранова: Уч. пособие. – Ярославль: изд-во ЯГТУ, 2020. – 93с.
24. Макаров, Ю.И. Проблемы смешивания сыпучих материалов / Ю.И. Макаров // Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева. – 1988. – № 4. – С. 384-389.

25. Estimation of mixing index and contact number by spot sampling of a mixture in an incompletely mixed state / H. Shindo, T. Yoshizawa, Y. Akao, L. T. Fan, F. S. Lai // Powder Technol. -1978. – v. 21. – P. 105.
26. Studies on multicomponent solids mixing and mixtures part I. Estimation of a mixing index from contact number for a homogeneous mixture // L. T. Fan, J. R. Too, F. S. Lai, Y. Akao // Powder Technol. – 1979. – v.22. – P. 205.
27. Fan, L. T. Recent developments in solid mixing / L. T Fan, Y. M. Chen, F. S. Lai // Powder Technology. -1990. –v 61– p. 255-287.
28. Shin, S. M. Characterization of solids mixtures by the discrete fourier transform / S. M. Shin, L. T. Fan // Powder Technol. –1978. – v19. – P. 137.
29. Wang, R. H. Application of pattern recognition techniques to solids mixing—feature extraction / R. H. Wang, F. S. Lai, L. T. Fan // Computers and Chem. Eng. -1977. – v1. – P. 171.
30. Lai, F. The variance-sample size relationship and the effects of magnesium stearate on ordered powder mixtures / F. Lai, J. A. Hersey // Chem. Eng. Sci. –1981. – V. 36. – p. 1133.
31. Таршис, М.Ю. Исследование качества сыпучей смеси. Моделирование. Критерии. Эксперимент: монография/ М.Ю. Таршис, Л.В. Королев, А.И. Зайцев. – Ярославль: Издат. дом ЯГТУ. 2015. 116 с.
32. Larrard, F. de Concrete Mixture Proportioning // Eds. E&FN Spon. - London, New York. – 1999. – 941 p.
33. Королев, Л.В. Спектральный критерий однородности смеси и его применение для характеристики процессов смешивания / Л.В. Королев, М.Ю. Таршис // Изв. вузов. Хим. и хим. технология. – 2002. – Т. 45, № 7. – С. 99-101.
34. Бытев, Д. О. Основы теории и методы расчета оборудования для переработки гетерогенных систем в дисперсно-пленочном состоянии. Дис. ... д. т. н., Ярославль: ЯГТУ, 1995. – 545с.
35. Таршис, М.Ю. Новые аппараты с эластичными рабочими элементами для смешивания сыпучих сред. М.Ю. Таршис, И.А. Зайцев, Д.О. Бытев, А.И. Зайцев, В.Н. Сидоров. // Теория и расчет. // Ярославль: Изд-во ЯГТУ. – 2003. – 84 с.

36. Таршис, М.Ю. Теория и принципы моделирования процесса смешивания сыпучих материалов и создания устройств с гибкими элементами для его реализации: монография / М.Ю. Таршис, Л.В. Королев, А.И. Зайцев. – Ярославль: изд-во ЯГТУ, 2011. – 100 с.
37. Зайцев, И.А. Математическое моделирование и оптимизация процессов смешения сыпучих материалов в новых валковых аппаратах с гибкими рабочими элементами: дис... канд. техн. наук: 05.17.08. – Ярославль, 2001. – 153с.
38. Капранова, А.Б. Моделирование процесса смешивания сыпучих сред в центробежном устройстве: монография / А.Б. Капранова, А.И. Зайцев. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2010. – 80 с.
39. Бакин М.Н., Капранова А.Б., Верлока И.И. Современные методы математического описания процесса смешивания сыпучих материалов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5-5. – С. 923-927; URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=34019>.
40. Таршис М.Ю. Теоретические основы и методология создания эффективных аппаратов с эластичными рабочими элементами для смешивания сыпучих материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08. – Ярославль, 2009. – 288 с.
41. Lai, F.S. The convective mixing process and striated mixture/ F.S. Lai, L.T. Fan, Y. Akao// Journal of Powder and Bulk Solids Technology. – 1978. – V.2. – P. 38.
42. Голованчиков, А.Б. Расчет химического реактора с диффузионной моделью структуры потоков и разными числами пекле по реагирующим компонентам/ А.Б. Голованчиков, Н.А. Дулькина, Ю.В. Аристова// Изв. вузов химия и хим. технология. – 2012. – Т.55, вып. 8. – С. 111-113.
43. Ряжских, В.Н. Расчет проточного аппарата идеального смешения с застойными зонами/ В.Н. Ряжских, О.Ю. Никанорова // Химия и химическая технология, 1994. – Т. 33. – С. 111-116.
44. Мошинский, А.И. Некоторые вопросы теории ячеечных моделей /А.И. Мошинский // Теор. основы хим. технологии. – 1990. – Т. 24. – № 6. – С. 743-754.

45. Мошинский, А.И. Ячеечные модели при сложных структурах потоков в аппаратах / А.И. Мошинский // Теор. основы хим. технологии. 1992. – Т. 26. – №3. С. 364-373.
46. Мошинский, А.И. О нелинейных уравнениях для ячеечных моделей / А.И. Мошинский // Теор. основы хим. технологии. – 1993. – Т. 27. – № 2. – С.130-135.
47. Бабенко, Ю.И. Операторные методы расчета ячеечных моделей химических аппаратов / Ю.И. Бабенко, А.И. Мошинский // Химическая промышленность. 1999. № 2. – С. 104-110.
48. Бабенко, Ю.И. Операторные методы расчета ячеечных моделей химических аппаратов / Ю.И. Бабенко, А.И. Мошинский // Химическая промышленность. – 1999. – № 7. – С. 59-64.
49. Першин, В.Ф. Модель процесса смешения сыпучего материала в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана / В.Ф. Першин // Теор. основы хим. технологии. – 1989. – Т. 23. – № 3. – С.370 – 377.
50. Perschin, V.F. The mixing and segregation of particulate solids of different particle size / V.F.Perschin, U.T. Selivanov, A.G. Tkachev // Abstracts of the 10 International congress of chemical equipment and automatics, «CHISA-90», Praha, Czechoslovakia, 1990. – P. 49.
51. Першин, В.Ф. Модель процесса смешения сыпучего материала в поперечном сечении вращающегося барабана / В.Ф. Першин // Порошковая металлургия. 1986. – № 10. – С. 1-5.
52. Селиванов, Ю.Т. Исследование влияния осевого движения на процесс непрерывного смешивания сыпучих материалов во вращающемся барабане / Ю.Т. Селиванов, В.Ф. Першин // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2003. – Т. 46. – Вып. 7. – С. 42-45.
53. Селиванов, Ю.Т. Методы расчета и совершенствования конструкций циркуляционных смесителей, обеспечивающих заданное качество смеси: дис... д-ра техн. наук / Ю.Т. Селиванов. – Тамбов: ТГТУ, 2005. – 336 с.

54. Федосенков, Б.А. Разработка технологических способов и исследование процесса приготовления сухих пищевых композиций в смесительных агрегатах непрерывного действия: Автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Кемерово: 1996. – 17 с.
55. Винер, Н.В. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине. пер. с англ., 2-е изд., М, 1968. – 312с.
56. Ляпунов А.А., Яблонский С.В. Теоретические проблемы кибернетики // Проблемы кибернетики. Вып. 9. М.: Физматгиз, 1963. С. 5-22.
57. Камалдинов, А.В. Разработка моделей и комплекса программ обеспечения системы компьютерного вейвлет-мониторинга процесса непрерывного смесеприготовления: Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Кемерово: 2006. – 21с.
58. Жуков, А.Н. Разработка непрерывно действующего смесительного агрегата и исследование процесса приготовления сухих смесей при высоких соотношениях смешиваемых компонентов: Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Кемерово: 2004. – 16с.
59. Бородулин, Д.М. Повышение эффективности процесса смешивания при получении комбинированных продуктов в смесительных агрегатах центробежного типа: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Кемерово, 2013. – 38 с.
60. Шушпанников, А. Б. Методология построения смесеприготовительных агрегатов вибрационного типа для сыпучих композиций: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Кемерово, 2016. – 31 с.
61. Бакин М.Н., Капранова А.Б., Верлока И.И. Современные методы математического описания процесса смешивания сыпучих материалов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5-5. – С. 923-927; URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=34019>.
62. Lai, F.S. The convective mixing process and striated mixture/ F.S. Lai, L.T. Fan, Y. Akao// Journal of Powder and Bulk Solids Technology. – 1978. - V.2. – P. 38.

63. Fan, L. T. Numerical and experimental simulation studies on the mixing of particulate solids and the synthesis of a mixing system: Mixing process and stochastic motion of mutually noninteracting particles/ L. T. Fan, F. S. Lai, Y. Akao, K. Shinoda, E. Yoshizawa// *Computers & Chemical Engineering* –1978. - V. 2. – Issue 1 - P. 19-32.
64. Баранцева, Е.А. Распределение времени пребывания частиц сыпучего материала в лопастном смесителе непрерывного действия / Е.А. Баранцева, В.Е. Мизонов, Ю.В. Хохлова // *Химическая промышленность сегодня*. – №3. – 2009. – С. 50-53.
65. Mizonov, V. Influence of crosswise non-homogeneity of particulate flow on residence time distribution in a continuous mixer / V. Mizonov, H. Berthiaux, C Gatumel, E. Barantseva, Y. K.Jiokhlova // *Powder Technology*. – 2009. – V. 190. – P. 6-9.
66. Wang, R.H. Residence time distribution models for continuous solids mixers / R.H. Wang // *Journal of Powder and Solids Technology* - 1987. – № 11. – P. 15-19.
67. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Энтروпийный и вариационный методы неравновесной термодинамики в задачах химической технологии/ В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, Э.М.Кольцова. – М.: Наука, 1988. – 367 с.
68. Пригожин, И. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках/И. Пригожин. – М.: Наука, 1985. – 328 с.
69. Макаров, Ю. И. Системно-информационный подход/ Ю. И. Макаров // *Процессы и аппараты химической техники*. – М.: МИХМ, 1977. – С. 143-148.
70. Марков, А.А. Исчисление вероятностей / А.А. Марков. М.: ГИЗ, 1924. – 202 с.
71. Колмогоров, А.Н. Основные понятия теории вероятностей / А.Н Колмогоров. М.: ОНТИ, 1936. – 350 с.
72. Баруча-Рид, А.Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения /А.Т. Баруча-Рид. - М.: Наука, 1969. – 225 с.
73. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и её приложения/ В. Феллер. – Т.1. – М.: Мир, 1984. – 528с.

74. 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.
75. Таршис, М.Ю. Теория и принципы моделирования процесса смешивания сыпучих материалов и создания устройств с гибкими элементами для его реализации/ М.Ю. Таршис, Л.В. Королев, А.И. Зайцев. - Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2010. – 102с.
76. Henrique, C. Diffusion as a mixing mechanism in granular materials/ C. Henrique, G. Batrouni, D. Bideau // *Physical Rev. E*. 2000. – V. 63. – P. 1304-1 – 1304–9.
77. Бабуха, Г.Л. Взаимодействие частиц полидисперсных материалов в двухфазных потоках/ Г.Л. Бабуха, А.А. Шрайбер. – Киев: Наукова думка. – 1972. – 175 с.
78. Бондарь, А.Г. Математическое моделирование в химической технологии/ А.Г. Бондарь. – Киев: Вища школа, 1973. – 279 с.
79. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. – М.: Химия, 1969. – 565 с.
80. Дудников, Е.Г. Построение математических моделей химико-технологических объектов/ Е.Г. Дудников, Б.С. Балакирев, В.Н. Кривсунов, А.С. Цирлин. – М.: Химия, 1970. – 312 с.
81. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической технологии/А.Н. Плановский, В.М. Рамм, С.Э. Каган. – М.: Госхимиздат, 1962. – 846 с.
82. Koga, J. Mixing of solid particles of different density in a horizontal batch mixer. Measurement of axial diffusion coefficients/ J. Koga, K. Yamaguchi, I. Inoue// *Powder Technology*. – 1980. – V. 26. - Issue 2. – P. 127–130.
83. Hwang, L. Diffusive mixing in flowing powders / L. Hwang, R. Hogg // *Powder Technology* – 1980. – V. 26. - Issue 1. – P. 93–101.
84. Бытев, Д.О. Системно - структурный подход к моделированию процессов смешения сыпучих материалов в низкочастотных вибрационных аппаратах/ Бытев

- Д.О., В.Ф. Ковтун, А.И. Зайцев // Изв. вузов. Химия и хим. технология. - 1988, т. 31. – Вып. 5. – С. 117-121.
85. Fan, L.T. Stochastic diffusion model of non-ideal mixing in a horizontal drum mixer / L.T. Fan, S.U. Shin // Chemical engineering science. – 1979. – V. 34. – № 6. –Р. 811-821.
86. Куни, Ф.М. Статистическая физика и термодинамика/ Ф.М. Куни, М.: Наука, 1981. – 352 с.
87. Нигматулин, Р.И. Основы механики гетерогенных сред. – М.: Наука, 1978. – 336 с.
88. Александровский, А.А. Исследование процесса смешения и разработка аппаратуры для приготовления композиций, содержащих твердую фазу. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Казань: КХТИ, 1976. - 48 с.
89. Мизонов, В.Е. Применение теории марковских цепей к моделированию механических процессов химической технологии/ В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева, Н. Berthiaux, К. Marikh// 5 международная научная конференция "Теоретические и экспериментальные основы создания новых высокоэффективных химико-технологических процессов и оборудования" Сборник трудов. – Иваново, 2001. – С.92-94.
90. Мизонов, В.Е. Применение теории марковских. цепей к моделированию механических процессов химической технологии/В.Е. Мизонов, Е.А. Баранцева, Н. Berthiaux // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2001. – Т.44. – Вып. 3. – С. 123.
91. Саблинский, А.И. Разработка и исследование непрерывнодействующего смесеприготовительного агрегата на основе теории марковских процессов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Кемерово: 2004. – 16с.
92. Аун М. Математическая модель смесителя периодического действия /М. Аун, Е.А. Баранцева, К. Марик, В.Е. Мизонов, А. Бертъе // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2001. – Т. 44. – Вып. 3. – С. 140-142.

93. Марик К. Математическая модель процесса непрерывного смешения сыпучих материалов / К. Марик, Е.А. Баранцева, В.Е. Мизонов, А. Бертье // Вестник вузов. Химия и хим. технология. – 2001. – Т. 44. – Вып. 2. – С.121-123.
94. 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.
95. Kuperman V. Yu/ Nuclear Magnetic Resonance Measurements of Diffusion in Granular Media/V. Kuperman. - Physical Review Letters – 77. – 1996. – P. 1178-1181.
96. Мизонов, В. Е. Ячеечная модель конвективной диффузии в сложной плоской области с перегородками/ В.Е. Мизонов, И.А. Балагуров, В.А. Зайцев// Изв. вузов Химия и хим. технология. – 2013. –Т.56, вып. 6. – С. 105-107.
97. Исследование ударного смешивания твердых дисперсных сред при вторичных столкновениях частиц/ А.Б. Капранова, М.Н. Бакин, А.Е. Лебедев, А.И. Зайцев// Изв. вузов. Сер. Химия и хим. технология. – 2013. – т.56, вып. 6. – С.83-86.
98. Математическая модель механики движения сыпучих материалов в разреженных потоках аппаратов с эластичными рабочими органами/ А.Е. Лебедев, А.И. Зайцев. А.Б. Капранова, И.О. Кузьмин, // Изв. вузов. Сер. Химия и хим. технология. – 2012. – т.52, вып. 5. – С.111-113.
99. Лебедев А. Е. Научное обоснование и совершенствование технологических процессов и оборудования для переработки дисперсных материалов на принципе взаимодействия рационально сформированных дисперсных потоков: автореф. дис. д. т. н., Ярославль: ЯГТУ, 2015. 36с.
100. Моделирование процесса получения сыпучих смесей в разреженных потоках: монография/ А.Б. Капранова, И.И.Верлока, М.Ю. Таршис. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2021. – 80 с.
101. Капранова А.Б. Сравнительный анализ равновесных и неравновесных функций распределения смешиваемых сыпучих сред / А.Б. Капранова, И.И. Верлока, А.И. Зайцев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-

28: сб. тр. 28-й Междунар. науч. конф. В 12 т. Т 8. - Саратов: Саратов. Гос. Техн. ун-т, 2015; Ярославль: Яросл. Гос. Техн. ун-т; Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2015. – С.223-227.

102. Капранова А.Б. Сопоставление кинетических уравнений в стохастических моделях смешивания сыпучих сред / А.Б. Капранова, И.И. Верлока, А.И. Зайцев// Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: сб. тр. 28-й Междунар. науч. конф. В 12 т. Т 8. - Саратов: Саратов. Гос. Техн. ун-т, 2015; Ярославль: Яросл. гос. техн. ун-т; Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2015. – С.241-246.

103. Kapranova, A. B. Stochastic Description of the Formation of Flows of Particulate Components in Apparatuses with Brush Elements. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2018. V. 52. N. 6. P. 1004-1018.

104. Анализ параметров модели смешения полимерных компонентов в пересекающихся потоках / А.Б. Капранова, Д.В. Стенько, Д.Д. Бахаева, Д.В. Федорова, **П.М. Смирнов**, М.Ю. Таршис // Математические методы в технологиях и технике. – С.- Пб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2023. – Т. 7. – С. 39-46. DOI 10.52348/2712-8873\_ММТТ\_2023\_7\_39

105. Капранова А.Б., Бахаева Д.Д., Федорова Д.В., **Смирнов П.М.**, Таршис М.Ю. Моделирование формирования разреженных потоков частиц для киберфизических систем // Математические методы в технологиях и технике. 2024. № 11. С. 33-41. DOI 10.52348/2712-8873

106. Kapranova, A.B., Stenko, D.V., Bahaeva, D.D., Fedorova, D.V., **Smirnov, P.M.**, Tarshis, M.Y. (2024). Parameters of the Model of Mixing of Polymer Particles in Crossing Flows for the Cyber-Physical Platform. In: Kravets, A.G., Bolshakov, A.A. (eds) Cyber-Physical Systems. Studies in Systems, Decision and Control, vol 560. Published 02 December 2024. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-67911-7\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67911-7_12)

107. Kapranova, A.B., Bahaeva, D.D., Fedorova, D.V., **Smirnov, P.M.**, Tarshis, M.Y. (2025). Analysis of Rarefied Flows Formation Process in Chemical Technology Apparatuses for Cyber-Physical Systems. In: Kravets, A.G., Bolshakov, A.A. (eds) Cyber-Physical Systems: Engineering in Digital Era. Studies in Systems, Decision and

Control, 624. Published 26 November 2025. Springer, Cham.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-032-02544-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-032-02544-9_7)

108. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред/ Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1987. – Т. 1. – 464 с.

109. Нигматулин, Р.И. Основы механики гетерогенных сред. – М.: Наука, 1978. – 336 с.

110. Борщев, В.Я. Сдвиговые течения зернистых сред в теплообменных и гидромеханических процессах: дис... докт. техн. наук/ В.Я. Борщев. – Тамбов, 2008. – 368 с.

111. Lu, G., Third, J. R., Müller, C. R. (2015). Discrete element models for non-spherical particle systems: From theoretical developments to applications. *Chemical Engineering Science*, 127, 425–465. doi: 10.1016/j.ces.2014.11.050

112. Liu, Y. Modeling granular material blending in a rotating drum using a finite element method and advection-diffusion equation multi-scale model/ Y. Liu, M. Gonzalez, C. Wassgren // *Arxiv.org*. – 2017. – Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1704/1704.01219.pdf>

113. Bierwisch C., Kraft T., Riedel H., Moseler M. Three-dimensional discrete element models for the granular statics and dynamics of powders in cavity filling. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2009 V. 57 P. 10–31, DOI: 10.1016/j.jmps.2008.10.006

114. Nakamura, H., Fujii, H., Watano, S. Scale-up of high shear mixer-granulator based on discrete element analysis. *Powder Technology*. 2013. V. 236. P.149-156. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.03.009

115. Chan E.L., Washino K., Ahmadian H., Bayly A., Alam Z., Hounslow M.J., Salman A.D. DEM investigation of horizontal high shear mixer flow behaviour and implications for scale-up. *Powder Technology*. 2015. V. 270 (PB), P. 561-568. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.09.017

116. Amritkar A., Deb S., Tafti D. Efficient parallel CFD-DEM simulations using OpenMP. *Journal of Computational Physics*. 2014. V 256. P. 501-519. DOI: 10.1016/j.jcp.2013.09.007

117. Lu G., Third J. R., Müller C. R. Discrete element models for non-spherical particle systems: From theoretical developments to applications. *Chemical Engineering Science*. 2015. V. 127. P.425–465. DOI: 10.1016/j.ces.2014.11.050
118. Radeke C.A., Glasser B.J., Khinast J.G. Large-scale powder mixer simulations using massively parallel GPU architectures, *Chemical Engineering Science*. 2010. 65 (24). P. 6435-6442. DOI: 10.1016/j.ces.2010.09.035
119. Shigeto Y., Sakai M. Parallel computing of discrete element method on multi-core processors *Particuology*. 2019. V. 9. N 4. P. 398-405. DOI: 10.1016/j.partic. 2011.04.002
120. Lu L., Xu Y., Li T., Benyahia S. Assessment of different coarse graining strategies to simulate polydisperse gas-solids flow. *Chemical Engineering Science*. 2018. V. 179. P. 53-63. DOI: 10.1016/j.ces.2018.01.003
121. Lommen S., Mohajeri M., Lodewijks G., Schott D. DEM particle upscaling for large-scale bulk handling equipment and material interaction. *Powder Technology*. 2019. V 352. P. 273-282. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.04.034
122. Zhang X., Vu-Quoc L. An accurate elasto-plastic frictional tangential force–displacement model for granular-flow simulations: Displacement-driven formulation. *Journal of Computational Physics*. 2007. V. 225. P. 730–752 DOI: 10.1016/j.jcp.2006.12.028
123. Черпицкий, С.Н. Математическое моделирование процесса смешивания сыпучих материалов в барабанно-лопастном смесителе/ С.Н. Черпицкий, Л.В. Королев, М.Ю. Таршис// Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 9. С. 112-120. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6504.
124. Chen J., Furuichi M., Nishiura D. Discrete Element Simulation and Validation of a Mixing Process of Granular Materials. *Materials* 2020, 13, 1208. Doi:10.3390/ma13051208www.mdpi.com/journal/materials
125. Musha Halidan, Ganga R. Chandratilleke, Kejun Dong, Aibing Yu The effect of interparticle cohesion on powder mixing in a ribbon mixer. *American Institute of Chemical Engineers AIChE Journal*. 2016. V. 62: 1023-1037. doi.org/10.1002/aic.15101
126. FEM simulation of particle flow and convective mixing in a cylindrical bladed mixer. L Bai, QJ Zheng, AB Yu. *Powder technology* 313, 175-183, 2017. 33, 2017.

127. Liu P, Yang R, Yu A. DEM study of the transverse mixing of wet particles in rotating drums. Chem. Eng. Sci. 2013; 86: 99–107.
128. Исследование процесса смешивания сыпучих материалов в устройстве барабанного типа с дополнительными рабочими элементами / **Смирнов П. М.**, Черпицкий С. Н., Таршис М. Ю., Королев Л. В., Капранова А. Б. // Вестник Тамб. гос.техн. ун-та, 2024, т.30, №2, С. 285-291. DOI: 10.17277/vestnik.2024.02. pp.285-291.
129. Учет контактов частицы при моделировании движения сыпучего материала методом дискретных элементов/ М.Г.Костенко, **П.М. Смирнов**, Л.В. Королев, М.Ю. Таршис // Математические методы в технологиях и технике. 2024. № 12-1. С. 29-32. DOI 10.52348/2712-8873
130. Prigozhin, L Radial mixing and segregation of a binary mixture in a rotating drum: Model and experiment / L. Prigozhin, H. Kalman // Phys. Rev. E 57. – 1998. – p. 2073-2080.
131. Королев, Л. В. Приготовление плотных сыпучих смесей в устройстве гравитационно-пересыпного действия методом прямой подачи мелкой фракции в поток обрушения [электронный ресурс]/ Л. В. Королев, М. Ю. Таршис // Современные проблемы науки и образования. – 2008. – №3. - Режим доступа: [www.science-education.ru/number\\_2008\\_03.html](http://www.science-education.ru/number_2008_03.html). – М.-ИД «Академия естествознания» – 2008. – №3. – С.116–121.
132. Королев, Л. В. Исследование процессов смешивания и сегрегации сыпучих материалов в устройствах гравитационно-пересыпного действия / Л. В. Королев, М. Ю. Таршис // Изв. вузов. Хим. и хим. технолог. - 2008. - Т. 51, №. 8. - С.70-71.
133. Волков, М.В. Исследование механики движения сыпучего материала в поперечном сечении смесителя гравитационно-пересыпного действия // М.В. Волков, Л.В. Королев, М.Ю. Таршис // "Фундаментальные исследования" № 5 (часть 4) 2014. – С. 692-696.
134. Волков, М.В. Математическая модель процесса смешивания сыпучих материалов в новом устройстве гравитационно-пересыпного действия/ М.В. Волков, Л.В. Королев, М.Ю. Таршис// "Фундаментальные исследования" № 9 (часть 5) 2014. – С. 960-964.

135. Черпицкий, С.Н. О влиянии параметров барабанно-лопастного смесителя на его сглаживающую способность. Черпицкий С.Н., **Смирнов П.М.**, Таршис М.Ю. В сборнике: Семьдесят пятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием. Сборник материалов конференции. В 3-х частях. Ярославль, 2022. – С. 132-135.
136. **Смирнов, П.М.** Разработка принципиальных схем барабанных смесителей сыпучих материалов с эластичными рабочими элементами / **П.М. Смирнов**, С.Н. Черпицкий, М.Ю. Таршис // Семьдесят шестая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием: сборник материалов конференции. – Ярославль, 2023. – С. 104–107.
137. **Смирнов, П.М.** Методы совершенствования процесса смешивания сыпучих материалов в аппаратах гравитационно-пересыпного действия / **П. М. Смирнов**, Л. И. Филинков, М. Ю. Таршис // Семьдесят восьмая Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием (24.04.2025). – Ярославль: Издательский Дом ЯГТУ, 2025. – С. 349–352.
138. Пат. 2812190 Российская Федерация, МПК В01F 9/02, МПК В01F 3/18 Смеситель сыпучих материалов / М.Ю. Таршис, **П.М. Смирнов**, Л.В. Королев, А. Б. Капранова. – Оpubл.: 24.01.2024. – Бюл. № 3..
139. **Смирнов, П.М.** Экспериментальные исследования параметров, определяющих ресурс фильтра системы очистки газов / **П.М. Смирнов**, М.Ю. Таршис // Семьдесят пятая всероссийская научно – техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием: сборник материалов конференции: в 3 ч. – Ярославль, 2022. – С. 136–139.
140. Исследование процесса смешивания сыпучих материалов в аппаратах с дополнительными рабочими элементами/ **П.М.Смирнов**, С.Н.Черпицкий, М.Ю. Таршис, Л.В. Королев, А.Б Капранова// Математические методы в технологиях и технике. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2023. – Т. 6. – С. 36-39. DOI 10.52348/2712-8873\_ММТТ\_2023\_6\_36

141. Бахаева, Д.Д. Метод цифровой диагностики качества смешиваемых продуктов на примере расчёта коэффициента неоднородности / Д.Д. Бахаева, А.Б. Капранова, **П.М. Смирнов** // XII Международный Беремжановский съезд по химии и химической технологии (XII International Beremzhanov Congress on Chemistry and Chemical Technology), 4-6 декабря 2024, Алматы, Казахстан : сборник тезисов докладов [Электронное издание]. – Алматы: НАО «КазНУ им. аль-Фараби», 2024. – 222 с. – С. 165. – ISBN 978-601-04-6895-5.
142. **Смирнов, П.М.** Применение бесконтактных методов исследования сыпучих смесей в аппаратах периодического и непрерывного действия / **П.М. Смирнов**, М.Ю. Таршис // 77-я Всероссийская научно-техническая конференция ЯГТУ студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием (17–18 апреля 2024 г. ) : сборник материалов конференции: в 3 ч., ч. 2 [Электронный ресурс]. – Ярославль: Издательство ЯГТУ, 2024. – 789 с. – 1 CD-ROM. – Текст: электронный. – С. 146–148.
143. Исследование барабанно-винтового ступенчатого смесителя сыпучих материалов / **П.М. Смирнов**, М.Г. Костенко, М.Ю. Таршис, Л.В. Королев, А.Б. Капранова // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 9. – С. 21–24. – DOI: 10.52348/2712-8873.
144. Пат. 2385454 Российская Федерация. Способ исследования качества смеси компонентов, различающихся по цвету/Таршис М.Ю., Королев Л.В., Зайцев А.И. – опубл.: 27.03.2010. Бюл. № 9.
145. Пат. 2690539 Российская Федерация. Способ исследования качества смеси компонентов, различающихся по цвету/ Таршис М.Ю., Черпицкий С.Н., Королев Л.В., Капранова А.Б. – опубл.: 04.06.2019. Бюл. № 3.
146. Пат. 2819489 Российская Федерация. Способ исследования качества смеси компонентов, различающихся по цвету/ Таршис М.Ю., **Смирнов П.М.**, Королев Л.В., Капранова А.Б. – опубл.: 21.05.2024. Бюл. № 3.
147. Исследование процесса смешивания сыпучих материалов в барабанно-винтовом ступенчатом устройстве / П.М. Смирнов, М.Г. Костенко, М.Ю. Таршис, Л.В. Королев, А.Б. Капранова // Вестник Тамбовского

государственного технического университета. – 2025. – Т. 31, № 3. – С. 467–473. – DOI: 10.17277/ vestnik. 2025.03. pp.467-473.

148. **Смирнов, П.М.** Экспериментальные исследования смесителей сыпучих материалов гравитационно-пересыпного действия / **П.М. Смирнов, С.Н. Черпицкий, М.Ю. Таршис** // Семьдесят шестая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием: сборник материалов конференции. – Ярославль, 2023. – С. 111-114.

149. Лебедев, А.Е. Аппараты для переработки дисперсных сред. Теория и расчет; монография / А.Е. Лебедев, А.И. Зайцев, А.Б. Капранова, А.А. Ватагин, С. Суид. – Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018 – 132 с. ISBN 978-5-9914-0737-3.

150. Paul, Edward L. Handbook of industrial mixing: science and practice [Текст]/ Edward L. Paul —Blackwell Publishing Ltd, 2004 —1432 p

151. Исследование процесса смешивания сыпучих материалов в барабанно-лопастном смесителе. / С.Н. Черпицкий, М.Ю Таршис., Л.В. Королев, А.Б. Капранова./Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2020. № 1. С. 3-10. DOI: 10.1007/s10556-020-00731-w.

152. Granular segregation in circular tumblers: Theoretical model and scaling laws. / С.Р. Schlick, Y Fan, P.B. Umbanhowar, J.M Ottino, R.M Lueptow/ Journal of Fluid Mechanics. 2015.V. 765. P. 632-652. DOI: 10.1017/jfm.2015.4.

153. Смирнов, Е.М. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии./ Е.М. Смирнов, Д.К. Зайцев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2004. 2(36). с.70-81.

154. Eymard, Robert Finite Volume Methods [Текст] / Robert Eymard, Thierry Galloult, Raphaile Herbin... et al. – Techniques of Scientific Computing (Part 3), 7, Elsevier, 2004 – pp.713-1020.

155. Моделирование процесса смешивания сыпучих материалов в барабанно-лопастном ступенчатом смесителе / **П.М. Смирнов, Л.В. Королев, М.Ю. Таршис, Е.Ф. Скурыгин** // Южно-Сибирский научный вестник. – 2024. – № 6. – С. 72–78. – Режим доступа: [http://s-sibsb.ru/images/articles/2024/6/S-SibSB\\_Issue\\_58-72-78.pdf](http://s-sibsb.ru/images/articles/2024/6/S-SibSB_Issue_58-72-78.pdf) (дата обращения: 15.08.2025).

156. Modeling the Mixing of Bulk Materials in a Drum-Screw Step Mixer / **Р.М. Smirnov**, L.V. Korolev, M.Y. Tarshis [et al.] // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2025. – DOI: 10.1134/S0040579525602079.
157. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М. : Финансы и статистика, 1986. – 369 с.
158. Тимонин А.С. Машины и аппараты химических производств: Учебное пособие для вузов / А.С. Тимонин, Б.Г. Балдин, В.Я. Борщев, Ю.И. Гусев и др.; под общей редакцией А.С. Тимонина. – Калуга: Издательство Н.Ф. Бочкаревой, 2008. – 872 с.
159. Рогалёв, Н.Д. Современные экологически чистые угольные тепловые электростанции / Н.Д. Рогалёв, П.В. Росляков // Труды Международной научно-практической конференции «УгольЭко-2016» (Москва, 27-28 сентября 2016). – Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. – С. 15-23.
160. Информационно-технический справочник ИТС НДТ 38-2017.
161. **Смирнов, П.М.** Экспериментальные исследования параметров, определяющих ресурс фильтра системы очистки газов / **П.М. Смирнов**, М.Ю. Таршис // Семьдесят пятая всероссийская научно – техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием: сборник материалов конференции: в 3 ч. – Ярославль, 2022. – С. 136-139.
162. **Смирнов, П.М.** Разработка высокоресурсного комбинированного фильтра повышенной эффективности для очистки газов промышленных предприятий / **П.М. Смирнов**, М.Ю. Таршис // Семьдесят шестая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием: сборник материалов конференции. – Ярославль, 2023. – С. 108-110
163. Пат. 2772440 Российская Федерация, МПК В01F 9/02, МПК В01F 3/18. Комбинированный воздушный фильтр / Лебедев А.Е., **Смирнов П.М.**, Павлов А.А., Гуданов И.С., Шеронова И.С., Долгин Д.С.– опубл.: 20.05.2022. Бюл. № 14.

ПРИЛОЖЕНИЯ

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ  
№ 2812190

## Смеситель сыпучих материалов

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ярославский государственный технический университет" ФГБОУВО "ЯГТУ" (RU)*

Авторы: *Таршиц Михаил Юльевич (RU), Смирнов Павел Михайлович (RU), Королев Леонид Владимирович (RU), Капанова Анна Борисовна (RU)*

Заявка № 2023114105

Приоритет изобретения 29 мая 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 24 января 2024 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 29 мая 2043 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Ю.С. Зубов*

## Приложение Б Патент РФ №2819489

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ


**ПАТЕНТ**НА ИЗОБРЕТЕНИЕ  
**№ 2819489****Способ исследования качества смеси компонентов,  
различающихся по цвету**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ярославский государственный технический университет", ФГБОУ ВО "ЯГТУ" (RU)*

Авторы: *Таршис Михаил Юльевич (RU), Смирнов Павел Михайлович (RU), Королев Леонид Владимирович (RU), Капранова Анна Борисовна (RU)*

Заявка № **2023120041**Приоритет изобретения **28 июля 2023 г.**Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации **21 мая 2024 г.**Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **28 июля 2043 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

  
Ю.С. Зубов

## Приложение В Программа для расчета

(\*Модуль для расчета процесса смешивания в барабанно-винтовом ступенчатом смесителе.\*)

(\*Внешние условия\*)

$g=9.8$  ;(\*ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup> \*)

(\*Конструктивные параметры\*)

$L=0.4$ ;(\*Длина устройства, м\*)

$\Delta l:=0.1*L$ ;(\*Длина зон загрузки-выгрузки, м \*)

$ns=3$ ;(\*число ступеней\*)

$Ri=\{0.15,0.23,0.375\}/2$ ;(\*Радиусы ступеней, м \*)

$R:=Ri[[1]]$ ;(\*Внешний радиус, м \*)

$bi:=\{0.03,0.035,0.05\}$ ;(\*Шаг винтового шнека по ступеням, м \*)

$lpi:=\{0.045,Ri[[2]]-Ri[[1]],Ri[[3]]-Ri[[2]]\}$ ;(\*Высота винтового шнека (=длины лопаток) по ступеням, м \*)

$\phi i=\{\pi/6,\pi/6,\pi/6\}$ ;(\*Угловое расстояние между лопатками на ступенях, рад \*)

(\*Физико-механические свойства смешиваемых фракций\*)

$nc=2$ ;(\*количество смешиваемых фракций\*)

$\rho k=\{840,660\}$ ;(\*Насыпные плотности, кг/м<sup>3</sup> \*)

$dk=\{0.00225,0.0003\}$ ;(\*Средние диаметры частиц, м \*)

$\alpha=70*\pi/180$ ;(\*Угол обрушения сыпучего материала, рад\*)

(\*Режимные параметры\*)

$\omega=\pi$ ;(\*Угловая скорость вращения барабана, рад/с \*)

$P0=0.03$ ;

$Pik=\{\{0.5,0.5\}*P0,\{0,1\}*P0,\{0,1\}*2*P0\}*10^{(-3)}$ ;(\*Объемы компонентов смеси, подаваемые через дозаторы каждой ступени в единицу времени, м<sup>3</sup>/с. \*)

(\*Модельные коэффициенты\*)

$Ks=0$ ;(\*Безразмерный параметр, входящий в формулу для потока сегрегации\*)

$Kp=0$ ;

(\*Безразмерный параметр, входящий в формулу для скорости частиц на поверхности с учетом лопаток\*)

(\*Параметры дискретизации \*)

$\Delta x:=0.07*Ri[[1]]$ ;

$\Delta y:=0.07*Ri[[1]]$ ;

$\Delta z:=0.05*L$ ;

(\*Размеры расчетной кубической ячейки, м \*)

(\* $\Delta t:=0.01*(2*\pi/\omega)$ ;\*)(\*Величина расчетного шага по времени, с \*)

(\*Функции для расчета поля скоростей и формы свободной поверхности\*)

ha[i\_,a\_]:= (Ri[[i]]^2- a[[i]]^2)^0.5;;

(\*Расстояние от оси вращения до линии обрушения, м. Здесь и далее a[[i]] - полудлина линии обрушения для i-ой ступени, м. Она определяется ниже с учетом мощностей дозаторов и скоростей продольного движения материала.\*)

h[x\_,i\_,a\_]:=If[Abs[x]<a[[i]],(ω\*(a[[i]]-x)\*(a[[i]]+x)/(2\*g\*Sin[α])^0.5\*(1-Kp\*Ipi[[i]]/Ri[[i]]\*Sin[(a[[i]]+x)/(φi[[i]]\*a[[i]])^2)),0];(\*Высота свободной поверхности материала, относительно линии обрушения, м\*)

Vz[i\_]:=(-1)^(i+1)\*(ω\*bi[[i]])/(2\*π);(\*Скорость продольного (вдоль оси z) движения материала в i-ой ступени, м/с\*)

Vxtr[x\_,y\_]:=ω\*y; Vytr[x\_,y\_]:=-ω\*x;(\*Компоненты x и y скорости движения материала в транспортирующей зоне, м/с\*)

Vxa[x\_,y\_,i\_,a\_]:=((2\*g\*Sin[α]\*(y+ha[i,a]))/(ω\*(a[[i]]-x)))\*(1-Kp\*Ipi[[i]]/Ri[[i]]\*Sin[(a[[i]]+x)/(φi[[i]]\*a[[i]])^2];

Vya[x\_,y\_,i\_,a\_]:=-ω\*x-((g\*Sin[α]\*(y+ha[i,a])^2)/(ω\*(a[[i]]-x)^2))\*(1-Kp\*Ipi[[i]]/Ri[[i]]\*Sin[(a[[i]]+x)/(φi[[i]]\*a[[i]])^2]\*(1-2\*(a[[i]]-x))\*((Kp\*(Ipi[[i]]/(Ri[[i]]\*φi[[i]]\*a[[i]]))\*Sin[(2\*(x+a[[i]])/(φi[[i]]\*a[[i]))]/(1-Kp\*Ipi[[i]]/Ri[[i]]\*Sin[(a[[i]]+x)/(φi[[i]]\*a[[i]])^2])));(\*Компоненты x и y скорости движения материала в зоне обрушения, м/с\*)

Wsegrx[c\_]:=Module[{sum},  
sum=Sum[c[[kk]]\*ρk[[kk]]/dk[[kk]]^2,{kk,1,nc};  
Table[If[(Plus@@c)>0,  
Ks\*Sin[α]\*(Ri[[1]]\*g)^0.5\*c[[k]]\*(1-  
ρk[[k]]/dk[[k]]^2/sum\*(Plus@@c)),0],{k,1,nc}];

Wsegry[c\_]:=Module[{sum},  
sum=Sum[c[[kk]]\*ρk[[kk]]/dk[[kk]]^2,{kk,1,nc};  
Table[If[(Plus@@c)>0,  
-Ks\*Cos[α]\*(Ri[[1]]\*g)^0.5\*c[[k]]\*(1-  
ρk[[k]]/dk[[k]]^2/sum\*(Plus@@c)),0],{k,1,nc}];

(\*Компоненты x и y плотности потоков сегрегации для k-го компонента в зоне обрушения i-ой ступени, м/с. Здесь c - концентрации компонентов в данном микрообъеме смеси. \*)

(\*Дискретизация поперечного сечения рабочего объема\*)

nx:=IntegerPart[2\*R/Δx]+2;

ny:=IntegerPart[R/Δy]+2;

nz:=IntegerPart[L/Δz]+2;(\*Количество ячеек по осям x, y и z\*)

xx[jj\_]:= -R-Δx+(jj-0.5)\*Δx; уу[ii\_]:= -R-Δy+(ii-0.5)\*Δy; zz[kk\_]:= -Δz+(kk-0.5)\*Δz;(\*Координаты центров ячеек как функции их индексов\*)

isInStep[i\_,inds\_]:=Module[{rmin,rmax,r,ii,jj},jj=inds[[1]];ii=inds[[2]];rmin=Ri[[i]]-Ipi[[i]];

```

rmax=(Ri[[i]];r=xx[jj]^2+yy[ii]^2)^0.5;
(r>rmin)&&(r<rmax)&&(yy[ii]<0)];(*Проверка нахождения ячейки с индексами
inds внутри i-ой ступени*)
isInTrans[i_,inds_,a_]:=Module[{ii,jj,r},jj=inds[[1]];ii=inds[[2]];r=
r=xx[jj]^2+yy[ii]^2)^0.5; ;
(r<Ri[[i]])&&(yy[ii]<=-ha[i,a])&&(Abs[xx[jj]]<=a[[i]]);(*Проверка нахождения
ячейки с индексами inds внутри транспортирующей зоны i-ой ступени*)
isInAval[i_,inds_,a_]:=Module[{ii,jj,r},jj=inds[[1]];ii=inds[[2]];r=
r=xx[jj]^2+yy[ii]^2)^0.5;;
(r<Ri[[i]])&&(yy[ii]>-ha[i,a])&&(Abs[xx[jj]]<=a[[i]])&&(yy[ii]<=-
ha[i,a]+h[xx[jj],i,a]);(*Проверка нахождения ячейки с индексами inds внутри зоны
обрушения i-ой ступени*)
isOnAvalLine[i_,inds_,a_]:=isInTrans[i,inds,a]&&Not[isInTrans[i,inds+If[Length[inds]
==2,{0,1},{0,1,0}],a]]&&(xx[inds[[1]]]>0);(*Проверка нахождения ячейки с
индексами inds на нижней части линии обрушения i-ой ступени*)
isOnLeftLoadingZone[i_,inds_,a_]:=isOnAvalLine[i,inds,a]&&(zz[inds[[3]]]>=0)&&(z
z[inds[[3]]]<=Δl);
isOnRightLoadingZone[i_,inds_,a_]:=isOnAvalLine[i,inds,a]&&(zz[inds[[3]]]>=L-
Δl)&&(zz[inds[[3]]]<=L);
(*Проверка нахождения ячейки в левой (правой) загрузочной зоне i-ой ступени.*)

```

(\*Определение ячеек, занятых смесью, в каждой секции. Определение принадлежности ячеек к транспортирующей зоне, зоне обрушения и линии обрушения. Нахождение максимального значения параметра а для каждой ступени.\*)

```

detectAreas[totalcells_,i_,a_]:=Module[{trcells,avcells,onlinecells,stepcells,travcells},
trcells=Select[totalcells,isInTrans[i,#,a]&];
avcells=Select[totalcells,isInAval[i,#,a]&];
onlinecells=Select[totalcells,isOnAvalLine[i,#,a]&];
stepcells=Select[trcells~Join~avcells,isInStep[i,#]&];
{trcells,avcells,onlinecells,stepcells}
];(*Определение принадлежности ячеек к различным зонам.*)

```

```

estimateLoading[totalcells_,loading_,amax_]:=Module[{sq,sqint,sqintmax,ars},
sq=Table[Sum[loading[[j]],{j,1,i}]/Abs[Vz[i]],{i,1,ns}];
sqint=IntegerPart[sq/(Δx*Δy)];

```

```

sqintmax=ParallelTable[ars=detectAreas[totalcells,i,amax];Length[ars[[1]]]+Length[ars
[[2]]
,{i,1,ns}];
(*Print[sqint];Print[sqintmax];*)
Do[Print["Step number ",i," : ",IntegerPart[sqint[[i]]/sqintmax[[i]]*100]," %
loading"],{i,1,ns}];
];

```

(\*Оценка заполнения сечения каждой ступени при заданных мощностях дозаторов. \*)

```
findA[totalcells_,loading_]:=Module[{locareasvol,ok,aloc,sq,sqint},
  sq=Table[Sum[loading[[j]],{j,1,i}]/Abs[Vz[i]],{i,1,ns}];
  sqint=IntegerPart[sq/(Δx*Δy)];
  aloc=0.1*Ri;SetSharedVariable[aloc];
  ParallelDo[ok=True;
  While[ok,
  locareasvol=Map[Length,detectAreas[totalcells,i,aloc]]];
```

```
If[(locareasvol[[1]]+locareasvol[[2]]<sqint[[i]])&&(aloc[[i]]<Ri[[i]]),aloc[[i]]=aloc[[i]]
+Δx;,ok=False;];
];
aloc[[i]]=aloc[[i]]-Δx;
,{i,1,ns}];
aloc
];(*Нахождение значений параметра а для заданных площадей сечения, занятого
материалом, для каждой секции.*)
```

```
findAmax[totalcells_]:=Module[{locareasvol,ok,aloc},
  aloc=0.1*Ri;SetSharedVariable[aloc];
  ParallelDo[ok=True;
  While[ok,
  locareasvol=Map[Length,detectAreas[totalcells,i,aloc]]];
```

```
If[locareasvol[[1]]+locareasvol[[2]]==locareasvol[[4]],aloc[[i]]=aloc[[i]]+Δx;,ok=False;
];
];
aloc[[i]]=aloc[[i]]-Δx;
,{i,1,ns}];
aloc
];(*Нахождение максимальных значений параметра а для каждой секции.*)
```

```
setCellData[inds_,a_]:=Module[{i,data,flag,x,y},
  flag=False;x=xx[inds[[1]];y=yy[inds[[2]]];i=1;
  While[(i<=ns)&&Not[flag],
```

```
  data=<|"step"->i,"neighbours"-><||>,"conc"->Table[0,{j,1,nc}]]>;
  If[isInTrans[i,inds,a],AssociateTo[data,{"zone"->"trans","Vconv"-
  >{Vxtr[x,y],Vytr[x,y],Vz[i]}]];flag=True;];
```

```
If[isInAval[i,inds,a],AssociateTo[data,{"zone"->"aval","Vconv"-
>{Vxa[x,y,i,a],Vya[x,y,i,a],Vz[i]}]];flag=True;];
```

```
If[isOnLeftLoadingZone[i,inds,a],AssociateTo[data,{"zone"-
>"leftload","incomcomp"->0,"tunnel"->"no"}]];flag=True;];
```

```
If[isOnRightLoadingZone[i,inds,a],AssociateTo[data,{"zone"-
>"rightload","incomcomp"->0,"tunnel"->"no"}]];flag=True;];
```

```
i=i+1;
```

```
];
```

```
If[flag,data,<||>]
```

```
];(*Установка скоростей для каждой ячейки и принадлежности ячейке к
определенной зоне*)
```

```
(*setCells3Dinstep[allinds_,i_,a_]:=Module[{res,cd},
```

```
res=<||>;
```

```
Do[cd=setCellData[allinds[[ind]],i,a];
```

```
If[cd=<||>,AssociateTo[res,allinds[[ind]]□cd];];
```

```
,{ind,1,Length[allinds]}];
```

```
res
```

```
];*)
```

```
setCells3D[allinds_,a_]:=Module[{res,cd,selinds},
```

```
(*res=ParallelMap[setCells3Dinstep[allinds,#,a]&,Range[ns]];
```

```
(Join@@res)*)
```

```
selinds=Select[allinds,(Abs[xx#[[1]]]<Max[a]+2*Δx)&];
```

```
res=<||>;
```

```
Do[cd=setCellData[selinds[[ind]],a];
```

```
If[cd!=<||>,AssociateTo[res,selinds[[ind]]->cd];];
```

```
,{ind,1,Length[selinds]}];
```

```
res
```

```
];(*Исключение лишних ячеек, не покрывающих зону, занятую материалом.*)
```

```
refineCells[cells3D_]:=Module[{keys,drops},
```

```
keys=Keys[cells3D];
```

```
drops=Select[keys,((Not[KeyExistsQ[cells3D,#+{1,0,0}]]&&Not[KeyExistsQ[cells3D,
```

```
#-{1,0,0}]]||((Not[KeyExistsQ[cells3D,#+{0,1,0}]]&&Not[KeyExistsQ[cells3D,#-
```

```
{0,1,0}]]||((zz#[[3]]<0)||((zz#[[3]]>L))&
```

```
]);
```

```
KeyDrop[cells3D,drops]
```

```
];(*Исключение ячеек, нарушающих гладкость контура зоны.*)
```

```
setNeighbours[cells3D_]:=Module[{keys,matr,inds,nbs,res,cell},
```

```
keys=Keys[cells3D];matr=Table[0,{jj,1,nx},{ii,1,ny},{kk,1,nz}];
```

```

Map[(matr[[Sequence@@@]=1;0]&,keys];

res=Map[(inds=#;nbs=<||>;cell=cells3D[[Key[inds]]];
  If[matr[[Sequence@@(inds+{0,0,1})]]==1,AssociateTo[nbs,"forth"-
>(inds+{0,0,1})];];
  If[matr[[Sequence@@(inds+{0,0,-1})]]==1,AssociateTo[nbs,"back"->(inds+{0,0,-
1})];];
  If[matr[[Sequence@@(inds+{0,1,0})]]==1,AssociateTo[nbs,"north"-
>(inds+{0,1,0})];];
  If[matr[[Sequence@@(inds+{0,-1,0})]]==1,AssociateTo[nbs,"south"->(inds+{0,-
1,0})];];
  If[matr[[Sequence@@(inds+{1,0,0})]]==1,
  AssociateTo[nbs,"east"->(inds+{1,0,0})];];
  If[matr[[Sequence@@(inds+{-1,0,0})]]==1,AssociateTo[nbs,"west"->(inds+{-
1,0,0})];];AssociateTo[cell,"neighbours"->nbs]&
,keys];
res=AssociationThread[keys->res];
res];(*Определение соседей для каждой ячейки*)

setLoadingCells[cells3D_]:=Module[{allkeys,split,zmin,xmax,sections,currcell,totfluxes,
incomefluxes,res,zone,currselection,vincome,emitters,collectors,vtunnel,offset,vtr},
  split[arr_,n_]:=Map[Take[arr,{(#-
1)*Ceiling[Length[arr]/n]+1,Min[Ceiling[Length[arr]/n],Length[arr]}]&,Range[n]];

  res=cells3D;
  allkeys=Keys[res];
  zmin=Min[Transpose[allkeys][[3]]];

  sections=Map[Function[i,Select[allkeys,(currcell=res[[Key[#]]];(currcell[["step"]]==i)
&&#[[3]==zmin))&]],Range[ns]];

  totfluxes=Map[(currcell=res[[Key#[[1]]]];Abs[currcell[["Vconv"]][[3]]]*Length[#]*Δ
x*Δy)&,sections];
  incomefluxes=Table[If[i==1,totfluxes[[1]],totfluxes[[i]]-totfluxes[[i-
1]]]*Pik[[i]]/(Plus@@Pik[[i]]),{i,1,ns}];

  Do[
  zone=If[Mod[i,2]==1,"leftload","rightload"];

  currselection=Select[allkeys,(currcell=res[[Key[#]]];(currcell[["zone"]]==zone)&&(curr
cell[["step"]]==i))&];

  currselection=Map[Flatten[#,1]&,split[GatherBy[SortBy[currselection,#[[1]]&],#[[1]]&
],nc]];

```

```

vincome=Table[incomefluxes[[i,j]]/(Length[currselection[[j]]]* $\Delta x$ * $\Delta z$ ),{j,1,nc}];
Do[Map[(currcell=res[[Key[#]]];AssociateTo[currcell,{"incomecomp"->j,"vincome"-
>vincome[[j]]}];AssociateTo[res,#->currcell];&,currselection[[j]]];
,{j,1,nc}];
(*Print[Select[res,((#[["zone"]] $\square$  zone)&&#[["step"]]==i)&]]*
,{i,1,ns}];

```

```

Do[
zone=If[Mod[i,2]==0,"leftload","rightload"];

```

```

emitters=Select[allkeys,(currcell=res[[Key[#]]];(currcell[["zone"]]==zone)&&(currcell[
["step"]]==i))&];

```

```

collectors=Select[allkeys,(currcell=res[[Key[#]]];(currcell[["zone"]]==zone)&&(currce
ll[["step"]]==(i+1)))&];

```

```

xmax=Min[Max[Transpose[emitters][[1]],Max[Transpose[collectors][[1]]]];

```

```

emitters=Select[emitters,#[[1]]<=xmax&];
collectors=Select[collectors,#[[1]]<=xmax&];
vtunnel=totfluxes[[i]]/(Length[emitters]* $\Delta x$ * $\Delta z$ );
offset={0,emitters[[1,2]]-collectors[[1,2]],0};
Map[(currcell=res[[Key[#]]];vtr=currcell[["Vconv"]];AssociateTo[currcell,{"tunnel"-
>"emitter","vtunnel"->vtunnel,"Vconv"->{vtr[[1]],0,vtr[[3]]}}];AssociateTo[res,#-
>currcell];&,emitters];
Map[(currcell=res[[Key[#]]];AssociateTo[currcell,{"tunnel"->"collector","vtunnel"-
>vtunnel,"emitteraddr"->(#+offset)}];AssociateTo[res,#->currcell];&,collectors];
(*Print[Select[res,((#[["zone"]] $\square$  zone)&&#[["step"]]==i)&]]];
Print[Select[res,((#[["zone"]] $\square$  zone)&&#[["step"]]==i+1)&]];*)
,{i,1,ns-1}];

```

```

zone=If[Mod[ns,2]==0,"leftload","rightload"];emitters=Select[allkeys,(currcell=res[[Ke
y[#]]];(currcell[["zone"]]==zone)&&(currcell[["step"]]==ns))&];

```

```

vtunnel=totfluxes[[ns]]/(Length[emitters]* $\Delta x$ * $\Delta z$ );Map[(currcell=res[[Key[#]]];vtr=cur
rcell[["Vconv"]];AssociateTo[currcell,{"tunnel"->"emitter","vtunnel"-
>vtunnel,"Vconv"->{vtr[[1]],0,vtr[[3]]}}];AssociateTo[res,#->currcell];&,emitters];

```

res];(\*Определение ячеек для выгрузки-загрузки материала и скоростей подачи материала в эти ячейки.\*)

```

setBorders[cells3D_]:=Module[{res,currcell,vtr,nbs},
res=cells3D;
Map[(currcell=cells3D[[Key[#]]];

```

```

vtr=currcell[["Vconv"]];
nbs=Keys[currcell[["neighbours"]]];

If[vtr[[1]]>0&&FreeQ[nbs,"east"],If[!FreeQ[nbs,"south"],vtr[[2]]=vtr[[2]]-
vtr[[1]];vtr[[1]]=0;];];

If[vtr[[1]]<0&&FreeQ[nbs,"west"],If[!FreeQ[nbs,"north"],vtr[[2]]=vtr[[2]]-
vtr[[1]];vtr[[1]]=0;];];

If[vtr[[2]]>0&&FreeQ[nbs,"north"],If[!FreeQ[nbs,"east"],vtr[[1]]=vtr[[1]]+vtr[[1]];vtr[[
2]]=0;];];

If[vtr[[2]]<0&&FreeQ[nbs,"south"],If[!FreeQ[nbs,"west"],vtr[[1]]=vtr[[1]]+vtr[[1]];vtr[
2]]=0;];];

AssociateTo[currcell,"Vconv"->vtr];
AssociateTo[res,#->currcell];
)&,

Keys[cells3D]];
res
];(*Установка скорости движения материала для ячеек, находящихся на
границе занятого материалом объема.*)
(*setConcs0[cells3D_]:=AssociationMap[Table[0,{j,1,nc}]&,Keys[cells3D]];*)

changeLayer[layerwithNbs_,Δt_]:=Module[{res,layer,allcells,layerkeys,cell,nbs,nbaddr,
nbcell,conc,deltaconc,nbconc,vtr,nbvtr,wsx,wsy,nbwsx,nbwsy},
res=<|>;
layer=layerwithNbs[[2]];layerkeys=Keys[layer];
allcells=Join@@layerwithNbs;
Map[Function[addr,
(cell=layer[[Key[addr]]];
nbs=cell[["neighbours"]];
conc=cell[["conc"]];
vtr=cell[["Vconv"]];
deltaconc=Table[0,{j,1,nc}];
Map[nbaddr=nbs[[#]];
nbcell=allcells[[Key[nbaddr]]];
nbconc=nbcell[["conc"]];
nbvtr=nbcell[["Vconv"]];
Switch[#,
"forth",

```

If[(nbvtr[[3]]<0)&&(vtr[[3]]<=0),deltaconc=deltaconc+(\Delta t/\Delta z)\*Abs[nbvtr[[3]]]\*nbcon  
c;

];

If[(vtr[[3]]>0)&&(nbvtr[[3]]>=0),deltaconc=deltaconc-  
(\Delta t/\Delta z)\*Abs[vtr[[3]]]\*conc;],

"back",

If[(nbvtr[[3]]>0)&&(vtr[[3]]>=0),deltaconc=deltaconc+(\Delta t/\Delta z)\*Abs[nbvtr[[3]]]\*nbcon  
c;

];

If[(vtr[[3]]<0)&&(nbvtr[[3]]<=0),deltaconc=deltaconc-  
(\Delta t/\Delta z)\*Abs[vtr[[3]]]\*conc;],

"north",

If[(nbvtr[[2]]<0)&&(vtr[[2]]<=0),deltaconc=deltaconc+(\Delta t/\Delta y)\*Abs[nbvtr[[2]]]\*nbcon  
c;

];

If[(vtr[[2]]>0)&&(nbvtr[[2]]>=0),deltaconc=deltaconc-  
(\Delta t/\Delta y)\*Abs[vtr[[2]]]\*conc;],

"south",

If[(nbvtr[[2]]>0)&&(vtr[[2]]>=0),deltaconc=deltaconc+(\Delta t/\Delta y)\*Abs[nbvtr[[2]]]\*nbcon  
c;

];

If[(vtr[[2]]<0)&&(nbvtr[[2]]<=0),deltaconc=deltaconc-  
(\Delta t/\Delta y)\*Abs[vtr[[2]]]\*conc;],

"east",

If[(nbvtr[[1]]<0)&&(vtr[[1]]<=0),deltaconc=deltaconc+(\Delta t/\Delta x)\*Abs[nbvtr[[1]]]\*nbcon  
c;

];

If[(vtr[[1]]>0)&&(nbvtr[[1]]>=0),deltaconc=deltaconc-  
(\Delta t/\Delta x)\*Abs[vtr[[1]]]\*conc;],

"west",

If[(nbvtr[[1]]>0)&&(vtr[[1]]>=0),deltaconc=deltaconc+(\Delta t/\Delta x)\*Abs[nbvtr[[1]]]\*nbcon  
c;

];

```

    If[(vtr[[1]]<0)&&(nbvtr[[1]]<=0),deltaconc=deltaconc-
    ( $\Delta t/\Delta x$ )*Abs[vtr[[1]]]*conc;];
];

&,Keys[nbs]];

Switch[cell[["zone"]],
"aval",
Map[nbaddr=nbs[[#]];
nbcell=allcells[[Key[nbaddr]]];
nbconc=nbcell[["conc"]];
If[nbcell[["zone"]]==="aval",

wsx=Wsegrx[conc];wsy=Wsegry[conc];nbwsx=Wsegrx[nbconc];nbwsy=Wsegry[nbcon
c];
Switch[#,
"north",

deltaconc=deltaconc+( $\Delta t/\Delta y$ )*Table[If[nbwsy[[j]]<0,Abs[nbwsy[[j]]],0},{j,1,nc}];
deltaconc=deltaconc-( $\Delta t/\Delta y$ )*Table[
If[wsy[[j]]>0,Abs[wsy[[j]]],0},{j,1,nc}];,

"south",

deltaconc=deltaconc+( $\Delta t/\Delta y$ )*Table[If[nbwsy[[j]]>0,Abs[nbwsy[[j]]],0},{j,1,nc}];
deltaconc=deltaconc-( $\Delta t/\Delta y$ )*Table[
If[wsy[[j]]<0,Abs[wsy[[j]]],0},{j,1,nc}];,

"east",

deltaconc=deltaconc+( $\Delta t/\Delta x$ )*Table[If[nbwsx[[j]]<0,Abs[nbwsx[[j]]],0},{j,1,nc}];
deltaconc=deltaconc-( $\Delta t/\Delta x$ )*Table[
If[wsx[[j]]>0,Abs[wsx[[j]]],0},{j,1,nc}];,

"west",

deltaconc=deltaconc+( $\Delta t/\Delta x$ )*Table[If[nbwsx[[j]]>0,Abs[nbwsx[[j]]],0},{j,1,nc}];
deltaconc=deltaconc-( $\Delta t/\Delta x$ )*Table[
If[wsx[[j]]<0,Abs[wsx[[j]]],0},{j,1,nc}];
];
];

&,Keys[nbs]];
(*"trans",

```

```

qqqq;*)
"rightload",

(If[cell[["incomecomp"]]!=0,deltaconc[[cell[["incomecomp"]]]]=deltaconc[[cell[["incomecomp"]]]]+(Δt/Δy)*cell[["vincome"]];];
  If[cell[["tunnel"]]=="emitter",deltaconc=deltaconc-
(Δt/Δy)*cell[["vtunnel"]]*conc;];

If[cell[["tunnel"]]=="collector",deltaconc=deltaconc+(Δt/Δy)*cell[["vtunnel"]]*allcells[
[Key[cell[["emitteraddr"]]]][["conc"]];];),

"leftload",

(If[cell[["incomecomp"]]!=0,deltaconc[[cell[["incomecomp"]]]]=deltaconc[[cell[["incomecomp"]]]]+(Δt/Δy)*cell[["vincome"]];];
  If[cell[["tunnel"]]=="emitter",deltaconc=deltaconc-
(Δt/Δy)*cell[["vtunnel"]]*conc;];

If[cell[["tunnel"]]=="collector",deltaconc=deltaconc+(Δt/Δy)*cell[["vtunnel"]]*allcells[
[Key[cell[["emitteraddr"]]]][["conc"]];];
  ];
  conc=conc+deltaconc;
  If[Min[conc]<0,Print["Concentration is negative in the zone ",cell[["zone"]], " in
step ",cell[["step"]], " !"];];

  AssociateTo[cell,"conc"->conc];
  AssociateTo[res,addr->cell];)
,layerkeys];

res
];>(*Изменение концентраций компонентов на очередном шаге вычислений.*)

crossceFlow[slice_]:=Module[{stepsdata,fls},stepsdata=Table[Select[Values[slice],#[["step"]]==i&],{i,1,ns}];

fls=Δx*Δy*Table[Plus@@(Map[#[["conc"]]*Abs[#[["Vconv"]][[3]]]&,stepsdata[[i]]]),
{i,1,ns}];
  fls
];

crossceMaxFlow[slice_]:=Module[{stepsdata,fls},stepsdata=Table[Select[Values[slice
],#[["step"]]==i&],{i,1,ns}];
  fls=Δx*Δy*Table[Plus@@(Map[Abs[#[["Vconv"]][[3]]]&,stepsdata[[i]]]),{i,1,ns}];
  fls

```

```
];
```

```
flowControle[gatheredCells3D_]:=Module[{giventotflows,fls,flowspergiven},
  giventotflows=Table[Sum[Pik[[j]],{j,1,i}],{i,1,ns}];
```

```
flowspergiven=Map[(fls=crosscecFlow[#];Table[fls[[i,j]]/giventotflows[[i,j]],{i,1,ns},{j,1,nc}])&,gatheredCells3D];
```

```
GraphicsRow[Table[ListPlot[Table[Table[flowspergiven[[k,i,j]],{k,1,Length[flowspergiven]}],{j,1,nc}],PlotMarkers->Automatic,PlotRange->All,PlotLabel->"step="<>ToString[i]],{i,1,ns}],ImageSize->Large]
];
```

```
flowRealControle[gatheredCells3D_]:=Module[{giventotflowsnormalized,fls,maxfl,flowspergiven},
  giventotflowsnormalized=Map[#/(Plus@@#)&,Table[Sum[Pik[[j]],{j,1,i}],{i,1,ns}]];
```

```
flowspergiven=Map[(fls=crosscecFlow[#];maxfl=crosscecMaxFlow[#];Table[fls[[i,j]]/(giventotflowsnormalized[[i,j]]*maxfl[[i]]),{i,1,ns},{j,1,nc}])&,gatheredCells3D];
```

```
GraphicsRow[Table[ListPlot[Table[Table[flowspergiven[[k,i,j]],{k,1,Length[flowspergiven]}],{j,1,nc}],PlotMarkers->Automatic,PlotRange->All,PlotLabel->"step="<>ToString[i]],{i,1,ns}],ImageSize->Large]
];(*Функции для контроля потоков материала в каждой ступени.*)
```

```
main[cells3D_,t_,Δt_,controleperiod_,locfilename_]:=Module[{tcurr,totkeys,gatheredtotkeys,gatheredCells3D,gatheredCells3DwithNbs,totlen,butchlen,butch,butches,restot},
  SetDirectory[NotebookDirectory[]];
  tcurr=0;restot={};
  totkeys=Keys[cells3D];
  gatheredtotkeys=GatherBy[SortBy[totkeys,#[[3]]&,#[[3]]&];
  gatheredCells3D=Map[AssociationMap[cells3D[[Key[#]]]&,#]&,gatheredtotkeys];
```

```
(*totlen=Length[gatheredCells3D];butchlen=If[Quotient[totlen,4]==IntegerPart[totlen/4],IntegerPart[totlen/4],IntegerPart[totlen/4]+1];*)
```

```
(*SetSharedFunction[changeLayer];*)
```

```
While[tcurr<=t+Δt,
```

```
gatheredCells3DwithNbs=Drop[Partition[{<||>}~Join~gatheredCells3D~Join~{<||>},3,1,1,-2];
```

```
(*butches=Table[Take[gatheredCells3DwithNbs,{(i-1)*Ceiling[totlen/4]+1,Min[i*Ceiling[totlen/4],totlen]}],{i,1,4}];*)
```

```
(*gatheredCells3D=Flatten[Parallelize[Map[Function[butch,Map[changeLayer[#,<math>\Delta t</math>]&,butch]],butches]],1];*)
gatheredCells3D=Map[changeLayer[#,<math>\Delta t</math>]&,gatheredCells3DwithNbs];
If[tcurr-
controleperiod*IntegerPart[tcurr/controleperiod]<<math>\Delta t</math>,restot=restot~Join~{gatheredCells3
D};restot>>(locfilename);Print["Progress ",N[tcurr/t*100,3]," %"];
Print[flowRealControle[gatheredCells3D]];];
tcurr=tcurr+math>\Delta t</math>;
];
restot
];
```

(\*Основная программа для проведения вычислений. Концентрация компонентов смеси в ячейках в моменты дискретного времени, следующие от 0 до t с шагом  $\Delta t$ , и запись результатов в файл locfilename с периодичностью controleperiod.\*)

(\*Этап 1. Определение конфигурации области в сечении смесителя, занятой сыпучим материалом.\*)

(\*Этап 1.1 Определение предельно возможной загрузки.\*)

(\*Адреса всех ячеек в плоскости сечения\*)totalinds=Flatten[Table[{jj,ii},{jj,1,nx},{ii,1,ny}],1];

(\*Нахождения максимально возможного значения полуширины сечения, которое может быть занято смесью, для каждой ступени. \*)

```
amax=findAmax[totalinds];
```

(\*Определение расчетных ячеек, на которые разделяется смесь, при максимальном размере сечения. \*)areasmax=ParallelMap[detectAreas[totalinds,#,amax]&,Range[ns]];

(\*Отрисовка сечений ступеней с предельным заполнением.\*)

```
sectionPic[areasmax,amax]
```

(\*Этап 1.2 Оценка загрузки ступеней для заданных мощностей дозаторов. \*)

```
estimateLoading[totalinds,Map[Plus@@#&,Pik],amax];(*Оценка загрузки секций (в процентах от максимально возможной).*)
```

(\*Этап 1.3 Нахождение полуширины ступеней и ячеек, занятых смесью\*)

```
aw=findA[totalinds,Map[Plus@@#&,Pik]];
areasw=ParallelMap[detectAreas[totalinds,#,aw]&,Range[ns]];
sectionPic[areasw,aw]
```

(\*Этап 2. Определение массива ячеек, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда, покрывающего зоны рабочего объема, занятых смесью.\*)

(\*Адреса всех ячеек в объеме устройства\*)totalinds3D=Flatten[Table[{jj,ii,kk},{jj,1,nx},{ii,1,ny},{kk,1,nz}],2];

```
cells3D=setBorders[setLoadingCells[setNeighbours[refineCells[setCells3D[totalinds3D,aw]]]]];
```

(\*Этап 3. Вычисление концентраций компонентов смеси в ячейках в моменты дискретного времени, следующие от 0 до t с шагом  $\Delta t$ , и запись результатов в файл.\*)

```
Print[DateString[]];res=main[cells3D,3*(2*π/ω),0.002*(2*π/ω),0.25*(2*π/ω),"ident_particles_lines_0_4.dat"];Print[DateString[]];
```

## Приложение Г Справка с АО Кондор-Эко

Ассоциация "Центр инноваций Академии Электротехнических Наук РФ"

ХОЛДИНГОВАЯ ГРУППА "КОНДОР ЭКО - СФ НИИОГАЗ"



Системы менеджмента качества и окружающей среды  
сертифицированы по ИСО 9001:2015 и ИСО 14001:2015.  
Сертификаты DQS 302015 QM15  
от 23.08.2021 и DQS 302015 UM15 от 23.08.2021.

АО «Кондор-Эко»  
152101, Российская Федерация,  
Ярославская обл., Ростовский р-он,  
р.п. Семибратово, ул. Павлова, д. 5  
тел.: (4852) 20-80-25  
e-mail: info@kondor-eco.ru, kondore2000@mail.ru  
www.kondor-eco.ru  
ОКПО 12677570; ОГРН 1027601055282  
ИНН / КПП 7609012559 / 760901001

№ \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор



Е.Л. Жученко

## СПРАВКА

Об использовании результатов диссертационной работы  
Смирнова П.М.

Результаты диссертационной работы Смирнова П.М., а именно смеситель сыпучих материалов, выполненный в соответствии с патентом РФ № 2812190 (авторы: М.Ю. Таршин, П.М. Смирнов, Л.В. Королёв, А.Б. Капранова), а также программное обеспечение для расчета барабанно-винтового смесителя были рассмотрены на предмет использования в агрегате десульфуризации дымовых газов.

Эффективность применения смесителя в агрегате обеспечена:

- снижением расхода связующего компонента в смеси зола – гашеная известь;
- интенсификацией процесса десульфуризации за счет повышения площади контакта фаз (компонентов) при достижении значений коэффициента неоднородности получаемой смеси 10%;
- за счет снижения энергозатрат при использовании данного смесителя, являющегося низкоскоростным устройством;
- исключения негативного воздействия дымовых газов на окружающую среду.

Внедрение нового смесителя в производство предполагается во 2 - 4 кв. 2026 года.

Советник по науке, к.т.н.

В.А. Гузаев