

*На правах рукописи*

**ОСИПОВ Алексей Александрович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ  
ВИБРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕ-  
СЕЙ**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы  
(химической промышленности)

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Тамбов 2004

Работа выполнена в Тамбовском государственном техническом университете на кафедре «Прикладная механика и сопротивление материалов».

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор  
*Першин Владимир Федорович*

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
*Каталымов Анатолий Васильевич*  
кандидат технических наук, доцент

*Куди Андрей Николаевич*

**Ведущая организация** АО «Научно-исследовательский институт химикатов и добавок к полимерным материалам» («НИИ-химполимер»), г. Тамбов

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2004 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 Тамбовского государственного технического университета по адресу: г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1, ауд. 60.

Отзывы на автореферат, скрепленные гербовой печатью, направлять по адресу: 392620, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, ученому секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доцент

**В. М. Нечаев**

---

---

Подписано к печати 23.04.2004

Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 1,0 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 314

Издательско-полиграфический центр ТГТУ  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Многокомпонентные смеси из зернистых материалов широко используются в различных отраслях промышленности. Ключевым оборудованием в процессе приготовления смесей являются дозаторы компонентов и смеситель. Многие исследователи отмечают, что при проектировании смесительных установок необходимо учитывать характеристики дозаторов. Несмотря на большое количество работ, касающихся расчета и конструирования дозаторов и смесителей, практически отсутствуют исследования дозирочно-смесительных установок, как единого целого. Более того, как показал анализ конструкций дозаторов и смесителей, а также методик их расчета, часто возникают взаимоисключающие требования при проектировании. В последние годы получила развитие технология двухстадийного дозирования сыпучих материалов, которая позволяет повысить точность дозирования. Одним из достоинств данной технологии является высокая равномерность потока, даже при оценках за короткие промежутки времени. Это достоинство открывает новые перспективы в организации непрерывного процесса приготовления многокомпонентных смесей. В тоже время нет исследований совместного функционирования дозаторов и смесителя. Традиционные конструкции смесителей, а также известные дозаторы, реализующие технологию двухстадийного дозирования, не могут в полной мере реализовать все преимущества данной технологии для приготовления высококачественных многокомпонентных смесей.

В связи с этим возникла необходимость разработки новых способов дозирования и смешения зернистых компонентов и методики проектирования дозирочно-смесительных установок, реализующих технологию двухстадийного дозирования. В работе рассматривается указанная проблема, имеющая актуальное научное и практическое значение, определяющая направления исследований данной работы, которая выполнялась в соответствии с научно-техническими программами Министерства образования РФ: «Научные исследования высшей школы в области производственных технологий», код 001 – 2000 г.; «Производственные технологии» – 2001.

**Цель работы.** Исследование взаимосвязей между дозаторами компонентов и смесителем, создание на этой основе математической модели процесса непрерывного приготовления многокомпонентных смесей, совершенствование конструкций и методики расчета режимных и конструктивных параметров дозирочно-смесительных установок.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: проведен анализ способов непрерывного дозирования и смешения сыпучих материалов, а также устройств для реализации этих способов; проведено исследование процесса преобразования отдельных порций материала в непрерывный поток на вибрирующем наклонном лотке; исследовано влияние геометрических и режимных параметров на точность дозирования; исследовано смещение компонентов, в том числе и склонных к сегрегации, на вибрирующем секционированном транспортере. Разработана конструкция вибрационной установки для приготовления многокомпонентной смеси и предложена методика ее расчета.

### Научная новизна

Предложена физическая модель на основе функциональной связи потенциальной энергии порции сыпучего материала и скорости изменения этой энергии под воздействием вибрации, которая позволила получить аналитические зависимости для расчета основных параметров, характеризующих распределение сыпучего материала относительно наклонного вибрирующего лотка.

Разработаны математические модели псевдонепрерывного и дискретного движения порции сыпучего материала по наклонному вибрирующему лотку.

На основе предложенных моделей и полученных аналитических зависимостей разработана имитационная модель процесса непрерывного приготовления многокомпонентных смесей, позволяющая прогнозировать качество готовой смеси.

Теоретически и экспериментально обоснованы диапазоны изменения основных режимных и геометрических параметров вибрационной установки, при которых реализуется непрерывный процесс приготовления многокомпонентной смеси с гарантированным качеством.

### Практическая ценность

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложены новые способы непрерывного дозирования и смешения, а также устройства, которые повысили точность непрерывного дозирования и качество готовой смеси. На базе математической модели процесса преобразования отдельных порций в непрерывный поток и имитационной модели процесса смешения разработана методика расчета основных режимных и конструктивных параметров дозирочно-смесительных установок. В частности установлено, что рабочая длина лотка должна находиться в диапазоне  $3T_0/2 \leq L_L \leq (1-K_p)L_C$ , при частоте вибрации 100 Гц амплитуда колебаний от 0,15...1 мм, а угол наклона лотка к горизонту 0,3...0,5 от угла трения движения сыпучего материала.

Изготовлен опытный образец устройства для непрерывного приготовления многокомпонентных смесей, который успешно прошел апробацию на НТФ «ЛИОНИК» (г. Москва) и позволил сократить время процесса смешения в 2 раза.

### **Автор защищает**

Физическую модель процесса преобразования отдельных порций материала в непрерывный поток на вибрирующем лотке, в основу которой положен энергетический принцип описания движения сыпучего материала в сложном силовом поле. Математическую модель преобразования отдельных порций сыпучего материала в непрерывный поток на вибрирующем лотке и имитационную модель процесса непрерывного приготовления многокомпонентных смесей. Теоретическое и экспериментальное обоснование новых способов двухстадийного вибрационного дозирования и смешения сыпучих материалов. Методику расчета основных режимных и конструктивных параметров дозирочно-смесительных установок.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на Международных и Всероссийских конгрессах и конференциях. По теме диссертации опубликовано 12 работ.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованных источников (наименований работ отечественных и зарубежных авторов), приложений и документов, подтверждающих практическое использование результатов работы. Работа изложена на \_\_\_\_\_ страниц основного текста и содержит \_\_\_\_\_ рисунков.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, ее научная новизна и практическая значимость, основные положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** анализируется современное состояние проблемы непрерывного приготовления многокомпонентных смесей. Рассматриваются способы, устройства и методики расчета дозаторов и смесителей.

В результате анализа способов непрерывного дозирования установлено, что наиболее перспективной, с точки зрения повышения точности, является технология двухстадийного дозирования. В соответствии с этой технологией, на первой стадии формируются порции сыпучего материала, имеющие одинаковый вес, а на второй – эти порции преобразуются в непрерывный поток. Рассмотрены способы и устройства для преобразования отдельных порций в непрерывный поток. Анализируются подходы к описанию движения сыпучего материала под воздействием вибрации и перспективы использования вибрирующего лотка для преобразования отдельных порций в непрерывный поток и смешивания зернистых компонентов.

По результатам анализа сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** качественно проанализирован процесс движения отдельной порции сыпучего материала по наклонному лотку под действием вибрации, который показал, что данный процесс можно рассматривать как совокупность двух независимых процессов:

- изменение формы продольного сечения порции сыпучего материала на лотке;
- перемещение центра тяжести порции сыпучего материала вдоль лотка.

Проведя аналогию с движением сыпучего материала во вращающемся цилиндре и учитывая, что для описания движения сыпучего материала во вращающихся барабанах успешно используется энергетическая теория, была выдвинута следующая гипотеза. Система, представляющая собой совокупность

контактирующих частиц, находящихся на вибрирующей пластине в поле гравитационных сил, стремятся к состоянию, соответствующему возможному минимуму потенциальной энергии, причем скорость изменения потенциальной энергии системы пропорциональна разности потенциальных энергий рассматриваемого и конечного состояния (минимума потенциальной энергии) – движущая сила процесса. Поскольку энергетическое воздействие на систему осуществляется за счет вибрации, то скорость изменения потенциальной энергии системы пропорциональна также амплитуде и частоте вибрации. Данная гипотеза была проверена экспериментально следующим образом. В прозрачный короб, расположенный на вибрационном столе, вертикально устанавливали трубу, в которую засыпали порцию материала массой  $m$ . Трубу осторожно поднимали и материал, высыпаясь в короб, образовывал конус с закругленной вершиной. Включали вибратор и фиксировали движение материала на цифровую видеокамеру. На кадрах, сделанных в фиксированные моменты времени определяли положение центра тяжести материала (рис. 1) и рассчитывали потенциальную энергию относительно «нулевого уровня». За «нулевой уровень» принимали горизонтальную линию, проходящую через центр тяжести материала, открытая поверхность которого горизонтальна (линия О-О на рис. 1). Учитывая, что в соответствии с выдвинутой гипотезой  $\frac{df(t)}{dt} = KW_p$ , где  $W_p = f(t)$  – потенциальная энергия порции сыпучего материала в момент времени  $t$ , зависимость изменения  $W_p$  во времени была найдена в виде

$$f(t) = K e^{-\beta\sqrt{t}}. \quad (1)$$

Результаты обработки фотоснимков показали, что открытая поверхность материала в любой момент времени может быть описана синусоидой

$$y(t) = A \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (2)$$

Учитывая, что при фиксированной массе порции ее потенциальная энергия определяется положением центра тяжести, который однозначно определяется через амплитуду синусоиды, можно записать

$$A(t) = A_0 e^{-\beta\sqrt{t}}. \quad (3)$$

Отклонение расчетных значений от экспериментальных данных не превышают 10 %.

При определении взаимосвязи между амплитудой и полупериодом учитывали, что угол наклона открытой поверхности сыпучего материала к горизонту на краю синусоиды равен углу трения движения сыпучего материала о поверхность лотка. Поскольку, амплитуда колебаний лотка линейно уменьшается от загрузочного края к разгрузочному краю, параметр  $\beta$  также линейно будет уменьшаться по длине лотка, т.е.

$$\beta(S) = \beta_0 - K_\beta S. \quad (4)$$

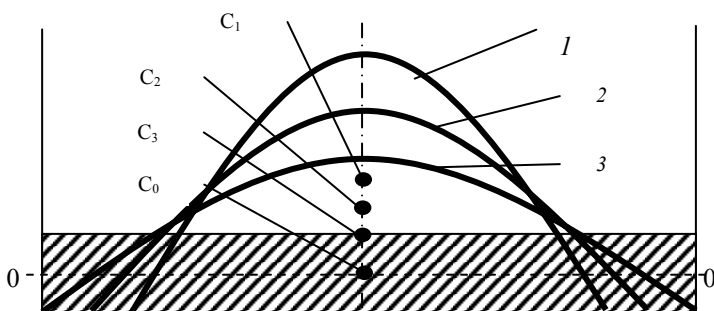


Рис. 1 Схема изменения конфигурации порции сыпучего материала

Таким образом, уравнение кривой, описывающей верхнюю границу порции сыпучего материала в процессе вибрации, запишется в следующем виде

$$y(t) = A_0 e^{-\beta(S)t} \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (5)$$

Далее исследовался процесс движения центра тяжести порции сыпучего материала вдоль наклонного вибрирующего лотка. Результат обработки видеосъемки процесса показал, что по мере продвижения материала вдоль лотка перемещение центра тяжести за равные промежутки времени уменьшается. Учитывая, что амплитуда колебаний линейно уменьшается от загрузочного края к разгрузочному, было сделано предположение о том, что ускорение движения центра тяжести так же линейно уменьшается по длине лотка, т.е., если:

$$A(S) = A_{0L} - k_A S, \text{ то } a(S) = a_0 - k_a S. \quad (6)$$

Зная закон изменения ускорения по длине лотка можно получить зависимость пути  $S$  от времени

$$S(t) = \frac{1}{\sqrt{k_a}} V_0 \sin(\sqrt{k_a} t) + \frac{1}{k_a} a_0 (1 - \cos(\sqrt{k_a} t)). \quad (7)$$

Определение численных значений параметров ( $V_0$ ,  $k_a$ ,  $a_0$ ) осуществляли для каждого конкретного сыпучего материала, при фиксированном угле наклона лотка к горизонту. На рис. 2 представлены результаты сравнения расчетных (сплошные линии 1, 3, 5) и экспериментальных данных (точки) по движению центра тяжести порции сыпучего материала.

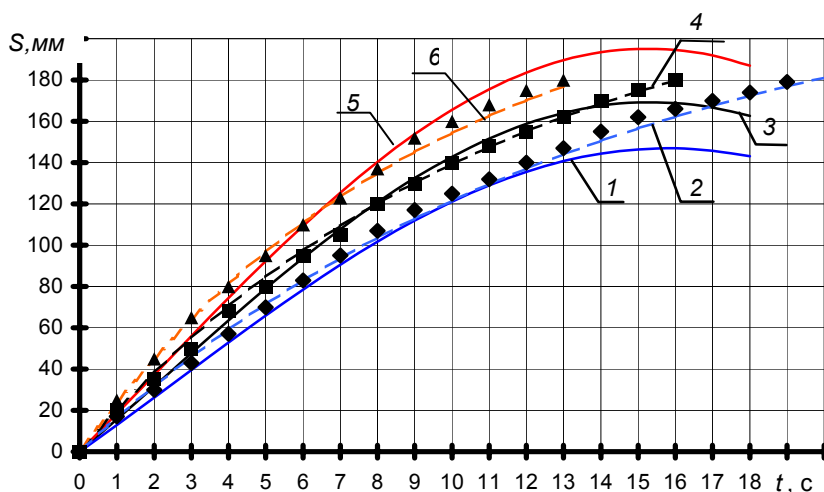


Рис. 2 Перемещение центра тяжести

порции сыпучего материала вдоль

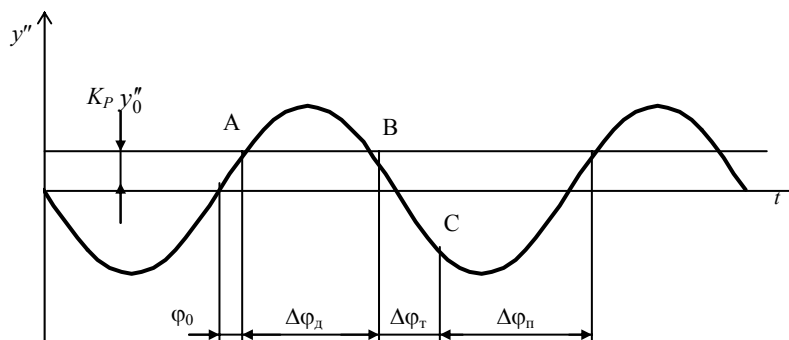
наклонного вибрирующего лотка, при углах наклона его к горизонту:

◆ 1, 2 –  $\alpha = 9^\circ$ ; ■ 3, 4 –  $\alpha = 11^\circ$ ; ▲ 5, 6 –  $\alpha = 13^\circ$

Несмотря на то, что данная модель удовлетворительно описывает движение сыпучего материала по наклонному вибрирующему лотку, она не может быть использована в ряде случаев, имеющих место при промышленном использовании вибрационных преобразователей, в частности, при нулевой начальной скорости ( $V_0 = 0$ ). Для устранения данного недостатка была разработана дискретная модель. Первоначально было рассмотрено движение отдельного твердого тела (параллелепипеда) по вибрирующему лотку, наклоненному к горизонту под углом, меньшим, чем угол трения параллелепипеда о поверхность лотка.

Вибрационное воздействие, перпендикулярное к поверхности лотка на определенном полупериоде колебания (лоток движется вниз), уменьшает силу нормального давления, а следовательно и силу трения до такого значения, при котором тело начинает движение с переменным положительным ускорением. Затем (лоток движется вверх), ускорение становится отрицательным, скорость уменьшается, вплоть

до остановки. Сила инерции, действующая на тело, зависит от ускорения в направлении, перпендикулярном поверхности лотка ( $y''$ ).



**Рис. 3** Изменение ускорения движения тела в направлении ,  
перпендикулярном к поверхности лотка

Если предположить, что сила трения преодолевается при значении  $y'' > K_p y_0''$ , то на протяжении  $\Delta\varphi_d$  тело будет двигаться с переменным положительным ускорением (от т. А до т. В рис. 3). На участке от т. В до т. С тело будет двигаться с отрицательным ускорением и в т. С остановится. На участке от т. С до т. А тело будет неподвижно, а затем цикл движения повторится. Ускорение движения тела от т. А до т. С можно определить используя следующее соотношение

$$ma = mg \sin \alpha - f_{\text{ТР}}(mg \cos \alpha + my''(t)). \quad (8)$$

Поскольку по длине лотка амплитуда колебаний линейно уменьшается, то перемещение тела за одно колебание, по мере его продвижения вдоль лотка, будет уменьшаться. Временной интервал, в течение которого происходит движение тела, можно определить следующим образом

$$\Delta t(S) = \frac{\pi - 2 \arcsin \frac{K_p y_0''}{a_0 - k_a S}}{\pi - 2 \arcsin K_p} \Delta t_0. \quad (9)$$

При описании процесса движения твердого тела по наклонному лотку в дискретной форме, исходя из теоретического анализа процесса, были сделаны следующие допущения:

- 1) за период одного колебания лотка тело движется с некоторой постоянной скоростью;
- 2) средняя скорость пропорциональна амплитуде колебаний, а, следовательно, пройденному пути, т.е. расстоянию от загрузочного края до центра тяжести тела;
- 3) время движения тела за одно колебание лотка уменьшается по длине лотка в соответствии с зависимостью (9).

Анализ результатов расчета по данной модели и их сравнение с экспериментальными данными показали, что значение средней скорости прямо пропорционально синусу угла наклона лотка к горизонту, а значение  $K_p$  прямо пропорционально косинусу данного угла. При переходе от модели движения центра тяжести отдельного тела к модели движения центра тяжести порции сыпучего материала было сделано дополнительное допущение о том, что после начала ссыпания материала с лотка центр тяжести порции сыпучего материала движется с постоянной скоростью, равной скорости его движения на момент начала ссыпания.

Сравнение результатов расчета (пунктирные линии 2, 4, 6) по данной модели с экспериментальными данными (точки) представлено на рис. 2. Основное преимущество дискретной модели по сравнению с моделью псевдодискретного движения заключается в том, что значения ее параметров достаточно идентифицировать по результатам экспериментов, проведенных при одном значении угла наклона лотка к горизонту ( $\alpha_0$ ). Для определения параметров при других углах наклона лотка к горизонту ( $\alpha_i$ ) они определяются по следующим формулам:

$$V(\alpha_i) = V(\alpha_0) \sin(\alpha_i) / \sin(\alpha_0); \quad (10)$$

$$K_p(\alpha_i) = K_p(\alpha_0) \cos(\alpha_i) / \cos(\alpha_0). \quad (11)$$

Это преимущество существенно сокращает объем необходимых экспериментальных исследований при проектировании нового оборудования и определения оптимальных режимных параметров при использовании действующих установок для дозирования другого сыпучего материала.

Следующим этапом было исследование процесса объединения отдельных порций в непрерывный поток. По результатам экспериментов с порциями разного цвета сделано допущение о том, что в процессе преобразования порций сыпучего материала на наклонном вибрирующем лотке, поведение отдельных порций можно считать независимым. С учетом сделанного допущения процесс преобразования отдельных порций в непрерывный поток можно представить в следующем виде.

Через равные промежутки времени  $\Delta T$  в загрузочную часть лотка подается  $i$ -я порция материала. Для конкретного сыпучего материала форма и объем порции (при фиксированной ширине лотка) однозначно определены амплитудой  $A_0$  и полупериодом  $T_0/2$ . С течением времени  $t$  центр тяжести  $i$ -ой порции сыпучего материала перемещается вдоль лотка согласно дискретной модели движения. Поскольку процесс рассматривается как дискретный (время  $t$  изменяется дискретно с шагом  $\Delta t$ ), то на каждом переходе, т.е. для каждого нового значения времени  $t$  рассчитывается амплитуда  $A(t)$  и полупериод  $T(t)/2$ . Координаты центра тяжести и амплитуды предыдущей порции  $i - 1$  и последующей  $i + 1$  рассчитываются по тому же алгоритму при значениях времени  $t - \Delta T$  и  $t + \Delta T$  соответственно. При начале ссыпания материала с лотка, т.е. при выполнении условия  $S_i(t) + T(t) / 4 \geq L_L$  скорость движения центра тяжести считаем постоянной.

Схема к расчету количества материала, ссыпавшегося с лотка за интервал времени  $\Delta t$ , показана на

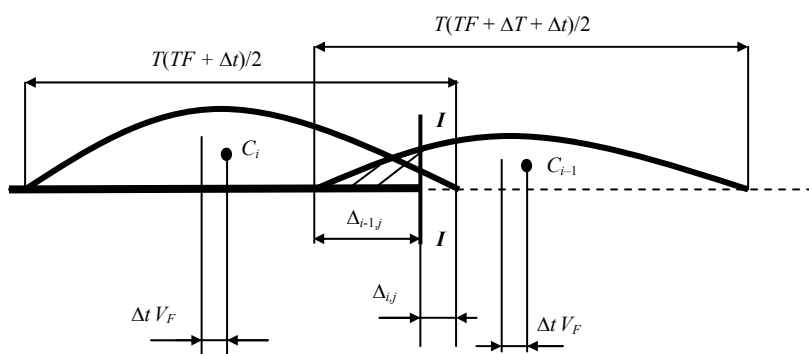


рис. 4.

**Рис. 4** Схема к расчету производительности вибрационного дозатора

Ссыпавший край лотка обозначен вертикальным сечением  $I-I$ . При одновременном ссыпании материала из предыдущей порции  $i - 1$  (на рис. 4 центр тяжести порции обозначен  $C_{i-1}$ ) и последующей порции  $i$  (центр тяжести порции обозначен  $C_i$ ) количество материала ( $\Delta Q$ ), ссыпавшегося с лотка, определяли как сумму  $\Delta Q_i$  и  $\Delta Q_{i-1}$ . Численное значение  $\Delta Q_i$  рассчитывалось, как разность количества материала порции  $i$ , находящегося левее сечения  $I-I$  в момент времени  $TF$  и аналогичного количества материала в момент времени  $TF + \Delta t$ . Аналогичным образом определяется значение  $\Delta Q_{i-1}$ . Производительность дозатора  $Q$  рассчитывается по формуле



$$Q = \frac{\Delta Q}{\Delta t}. \quad (12)$$

С использованием дискретной модели и полученных зависимостей для расчета производительности, как функции режимных и геометрических параметров дозатора, а также свойств дозируемого материала, разработан алгоритм и программа расчета производительности и точности вибрационного дозатора, реализующего технологию двухстадийного непрерывного весового дозирования зернистых материалов.

Результаты численных и натуральных экспериментов по дозированию различных материалов показали, что за счет изменения режимных и геометрических параметров, на выходе из дозаторов можно создавать непрерывные потоки с одинаковыми периодами отклонения производительностей от средних значений и постоянными отношениями мгновенных производительностей по разным компонентам. Другими словами, если выходной поток по компоненту  $A$  описывается функцией  $f_1(t)$ , а по компоненту  $B$   $f_2(t)$ , то выполняются следующие соотношения

$$\frac{\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} f_1(t) dt}{\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} f_2(t) dt} = \frac{\int_{t_2}^{t_2+\Delta t} f_1(t) dt}{\int_{t_2}^{t_2+\Delta t} f_2(t) dt} = \dots = \frac{\int_{t_k}^{t_k+\Delta t} f_1(t) dt}{\int_{t_k}^{t_k+\Delta t} f_2(t) dt} = \frac{Q_A \pm \delta Q_A}{Q_B \pm \delta Q_B} = \text{const} \pm \xi. \quad (13)$$

Численные значения  $\xi$  зависят от выбора величины  $\Delta t$  и точности дозирования компонентов. Данное обстоятельство позволило использовать принцип пропорционального дозирования компонентов в процессе непрерывного приготовления многокомпонентных смесей. В качестве смесителя использовали вибрационный секционированный ленточный смеситель. Были проведены экспериментальные исследования процесса смешения компонентов в отдельной секции смесителя под действием вибрации, что позволило выявить общие закономерности процесса и разработать модель с использованием математического аппарата случайных Марковских процессов, дискретных в пространстве и времени. Каждая секция состояла из ячеек идеального смешения, соединенных между собой в однородную незамкнутую Марковскую цепь. Поскольку рассматривался процесс смешения компонентов, склонных к сегрегации, было сделано допущение о том, что за один переход частица ключевого компонента либо останется в данной ячейке, либо перейдет в соседнюю, расположенную ближе к ядру сегрегации. Вероятность переходов определяется по формулам:

$$P_{i,i+1,m} = P_0(1 - C_{i+1,m-1}), \quad (14)$$

$$P_{i,i,m} = 1 - P_{i,i+1,m}. \quad (15)$$

Численное значение  $P_0$  определяется при идентификации параметров модели. Концентрация ключевого компонента в  $i$ -м подслое после  $k$ -го перехода

$$C_{i,k} = V_{\text{кл},i,k} / V_i. \quad (16)$$

Объем  $V_{\text{кл},i,k}$  складывается из объемов ключевого компонента  $V_{\text{кл},i,i,k}$ , остающегося в  $i$ -м подслое, и объема  $V_{\text{кл},i-1,i,k}$ , который перешел из соседнего вышележащего ( $i-1$ ) подслоя:

$$V_{\text{кл},i,k} = V_{\text{кл},i,i,k} + V_{\text{кл},i-1,i,k}; \quad (17)$$

$$V_{\text{кл},i,i,k} = V_i C_{i,k-1} - V_n C_{i,k-1} P_{i,i+1,k}; \quad (18)$$

$$V_{\text{кл},i-1,i,k} = V_n C_{i-1,k-1} P_{i-1,i,k}. \quad (19)$$

Концентрация ключевого компонента в момент времени  $\tau = m \Delta t$  можно определить из следующих соотношений:

для  $n$ -го подслоя

$$C_{n,k} = C_{n,k-1} + P_{n-1,n} C_{n-1,k-1}; \quad (20)$$

для первого подслоя

$$C_{1,k} = (C_{1,k-1} V_1 - P_{1,2} C_{1,k-1} V_n) / V_1; \quad (21)$$

для остальных подслоев

$$C_{i,k} = (C_{i,k-1} V_i - P_{i,i+1} C_{i,k-1} V_n + P_{i-1,i} C_{i-1,k-1} V_n) / V_i, \quad (22)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots, m$ .

При моделировании процесса смешения трех и более компонентов, например  $A+B+C$ , общий процесс рассматривали как три процесса, протекающих независимо ( $A+C$ ,  $A+B$ ,  $B+C$ ). В этом случае по результатам экспериментальных исследований процессов приготовления двухкомпонентных смесей определяли исходные вероятности, аналогичные  $P_0$ . В частности, исследуя процесс приготовления смеси  $A+C$  определяли вероятность  $P_{0AC}$ . Аналогичным образом определяли вероятности  $P_{0AB}$  и  $P_{0BC}$ . В зависимости от полученных значений и текущих концентраций компонентов в подслоях, т.е. значений концентраций на рассматриваемом переходе, вероятности переходов определяли по следующим формулам:

$$P_{Ai,i+1,k} = P_{0AC} C(C)_{i+1,k-1} + P_{0AB} C(B)_{i+1,k-1}, \quad (23)$$

$$P_{Bi,i+1,k} = P_{0BC} C(B)_{i+1,k-1}. \quad (24)$$

По формулам, аналогичным (16) – (22) рассчитывали концентрации компонентов  $A$  и  $B$  в подслоях в любой момент времени  $\tau = m \Delta t$ .

На основе математической модели преобразования отдельных порций в непрерывный поток и процесса вибрационного смешения, разработана имитационная модель процесса непрерывного приготовления многокомпонентных смесей.

**В третьей главе** даны результаты экспериментальных исследований двухстадийного непрерывного дозирования с использованием вибрирующего лотка и процесса приготовления многокомпонентных смесей. Эксперименты проводились в несколько этапов. На первом этапе была проверена гипотеза о закономерности изменения потенциальной энергии порции сыпучего материала. Движение отдельной порции сыпучего материала по наклонному вибрирующему лотку и объединение порций в непрерывный поток, и процесс двухстадийного дозирования исследовали на лабораторном вибрационном дозаторе. Длина лотка могла изменяться от 0,1 до 0,4 м, а ширина от 0,02 до 0,05 м. Привод позволял изменять и амплитуду вибрации в диапазоне 0,2...2 мм. Учитывая результаты ранее проведенных исследований, частота вибрации лотка была постоянна и равна 100 Гц. Угол наклона лотка к горизонту изменялся от 0 до +15°. Была также предусмотрена возможность изменения амплитуды по длине лотка за счет изменения расстояния от ссыпавшегося края лотка до шарнира. Для отбора проб использовали ленточный транспортер, секционированный вращающийся пробоотборник и весоизмерительную установку на базе весов ВЛК-500, цифрового планшета и персонального компьютера.

Подготавливали порции сыпучего материала весом  $\Delta P$  с погрешностью  $\delta P$ , которые через равные промежутки времени  $\Delta T$  высыпали в загрузочный узел лотка. Материал с лотка ссыпался на ленту транспортера, которая двигалась со скоростью  $V$ . С помощью секционированного пробоотборника с длиной ячейки  $S$ , ссыпавшийся материал разделяли на порции. Каждая порция соответствовала количеству материала  $\Delta Q$  ссыпавшегося с лотка за отрезок времени  $\Delta T_{пр} = S/V$ . При использовании весоизмерительной установки материал ссыпался на чашу весов, и рассчитывалась производительность дозатора за промежутки времени  $\Delta T_{вес}$ . Следует отметить, что в этом случае промежутки времени  $\Delta T_{вес}$  могли быть значительно меньше чем  $\Delta T_{пр}$ . Идентификация параметров математической модели осуществлялась следующим образом. Для конкретного сыпучего материала при фиксированных значениях геометрических и режимных параметров проводили несколько серий параллельных экспериментов и методом последовательных приближений рассчитывали такие значения параметров математической модели, при которых расхождения между расчетными значениями  $\Delta Q$  и экспериментальными данными были минимальными. В качестве материалов использовались фракции речного песка с размерами от 0,2 до 0,6 мм, пшено, семена люцерны, манная крупа.

Проверку адекватности математической модели проводили с использованием материалов, для которых были идентифицированы параметры математической модели. Опыты проводили при различных комбинациях геометрических и режимных параметров.

Процесс смешения исследовали следующим образом. Прозрачную емкость прямоугольного сечения, разделенную по высоте на несколько секций, устанавливали на вибростол. В емкость, в зависимости от поставленных целей, засыпали два или три компонента в определенных пропорциях. Компоненты засыпали послойно в порядке уменьшения размеров частиц. Включали вибратор и прекращали процесс через фиксированные промежутки времени. Начиная сверху последовательно снимали секции и определяли концентрацию компонентов в каждой из них. После повторения опытов и статистической обработки результатов методом последовательных приближений с использованием математической модели процесса смешения, определяли параметры модели и строили кинетические кривые процесса. Характерные результаты представлены на рис. 5.

Как видно из графиков, значение оптимального времени смешения для различных компонентов существенно отличаются. Например, для сочетания пшено-песок оптимальное время смешения – 5 с, а для сочетания пшено-люцерна – 25 с. Очевидно, что в процессе приготовления трехкомпонентной смеси пшено-люцерна-песок сначала необходимо загрузить пшено и люцерну, и только по истечению некоторого времени осуществить загрузку песка. Для того, чтобы увеличить интервал времени, в течение которого смесь имеет удовлетворительное качество, было предложено уменьшить амплитуду колебаний по мере приближения к оптимальному времени смешения.

На рис. 5 пунктирной линией показана кинетическая кривая для комбинации пшено-песок, при ступенчатом уменьшении амплитуды колебаний от 1 до 0,4 мм.

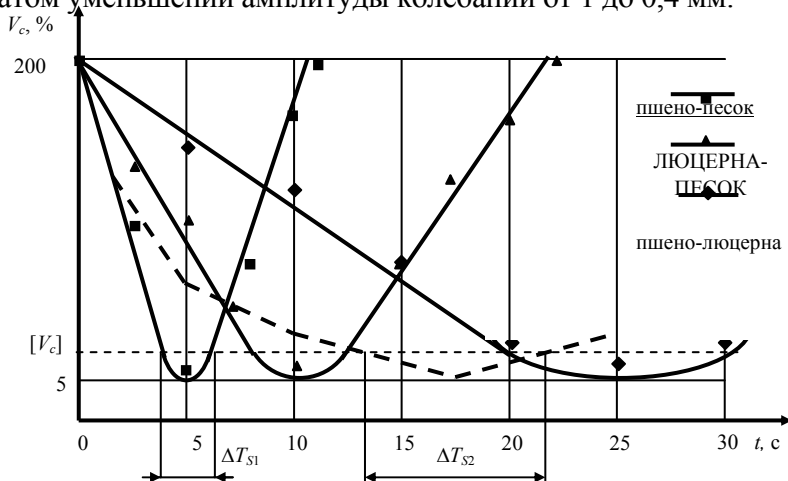


Рис. 5 Кинетические кривые процесса смешения

Как видно из графика, интервал времени, при котором коэффициент неоднородности смеси меньше допустимого значения  $[V_c]$  увеличился в 3 раза с  $\Delta T_{S1} = 2$  с до  $\Delta T_{S2} = 6$  с.

В четвертой главе дано описание новых способов непрерывного дозирования и смешения сыпучих материалов, устройств для их осуществления, а также приводится методика расчета основных геометрических и режимных параметров дозирочно-смесительной установки.

Способ приготовления многокомпонентной смеси включает загрузку компонентов в бункеры дозаторов, последовательную подачу этих компонентов в виде непрерывных потоков в смеситель, в сечения, расположенные на расстояниях от загрузочного края смесителя, пропорциональных увеличению плотностей и/или уменьшению размеров частиц, и выгрузку готовой смеси. Загрузку компонентов осуществляют отдельными порциями через равные промежутки времени  $\Delta T$  последовательно, начиная с дозатора, расположенного ближе к загрузочному краю смесителя, причем интервалы между загрузками пропорциональны расстояниям между разгрузочными узлами дозаторов, каждая порция компонента имеет одинаковый вес, пропорциональный процентному содержанию компонента в готовой смеси, и для всех компонентов выполняется следующее равенство

$$Q = \sum_{i=1}^N \Delta P_i / \Delta T \cdot \quad (25)$$

Устройство для приготовления многокомпонентных смесей сыпучего материала (рис. 6) содержит непрерывные дозаторы компонентов, расположенные последовательно вдоль ленточного транспортера 7 с поперечными перегородками 8, плиту 9, на которой установлен ленточный транспортер, соединенную с основанием через амортизаторы 11, и вибратор 13, установленный на основании и соединенный с плитой.

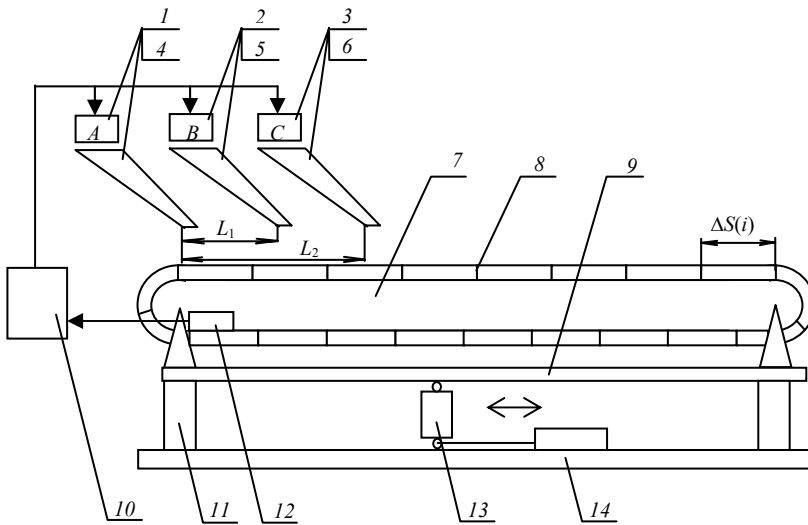


Рис. 6 Схема вибрационной дозировочно-смесительной установки

Каждый непрерывный дозатор содержит порционный дозатор (1, 2, 3) и наклонный вибралоток (4, 5, 6), для преобразования отдельных порций материала в непрерывный поток. Устройство снабжено блоком управления 10 порционными дозаторами, причем каждый вибралоток устанавливается с возможностью фиксированного перемещения вдоль ленточного транспортера. Вибратор соединен с плитой и основанием с помощью шаровых шарниров и установлен на основании с возможностью фиксированного перемещения в горизонтальной плоскости. Поперечные перегородки на ленточном транспортере установлены с возможностью фиксированного перемещения вдоль ленты транспортера и устройство дополнительно снабжено датчиком фиксации положения 12, по крайней мере одной по-

перечной перегородки ленточного транспортера, причем этот датчик соединен с блоком управления порционными дозаторами, что позволяет синхронизировать работу дозаторов и смесителя.

С учетом смещения разгрузочных узлов вдоль ленты транспортера и определенных промежутков между подачей отдельных порций компонентов, в разные ячейки транспортера попадают разные объемы компонентов, но их соотношение всегда постоянно и равно заданному соотношению компонентов в готовой смеси. Для варианта приготовления трехкомпонентной смеси  $(A + B + C)$ , математически это можно представить следующим равенством

$$\int_0^{\Delta\tau} f_1(T)dT \Big/ \int_0^{\Delta\tau+\Delta\tau_{AB}} f_2(T)dT \Big/ \int_0^{\Delta\tau+\Delta\tau_{AC}} f_3(T)dT = 0,5/0,3/0,2. \quad (26)$$

Поперечные перегородки на ленте можно установить таким образом, чтобы в каждую ячейку попадало одинаковое суммарное количество компонентов. В этом случае ширина ячеек  $\Delta S$  разная и пропорциональна изменению производительности на сыпавшихся краях дозаторов. Математически это можно представить следующим образом

$$\int_0^{\frac{\Delta S(1)}{V}} f_1(T)dT = \int_0^{\frac{\Delta S(2)}{V}} f_1(T)dT = \dots = \int_0^{\frac{\Delta S(M)}{V}} f_1(T)dT. \quad (27)$$

При выполнении равенства (26) для компонента  $A$  будет выполняться равенство (27). Аналогично для компонентов  $B$  и  $C$ . Это целесообразно делать в тех случаях, когда готовую смесь необходимо упаковывать или передавать на дальнейшую переработку в виде отдельных порций одинакового веса, например, при производстве таблеток или брикетов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1 Проведены экспериментальные исследования процесса преобразования отдельных порций сыпучего материала в непрерывный поток на наклонном вибрирующем лотке, позволившие определить диапазоны изменения основных режимных и геометрических параметров, при которых обеспечивается гарантированное преобразование отдельных порций в непрерывный поток, и в частности установить, что рабочая длина лотка должна находиться в диапазоне  $3T_0/2 \leq L_L \leq (1 - K_P)L_C$ , при частоте вибрации 100 Гц амплитуда колебаний от 0,15...1 мм, а угол наклона лотка к горизонту 0,3...0,5 от угла трения движения сыпучего материала.

2 На основе выдвинутой гипотезы о функциональной связи потенциальной энергии порции сыпучего материала и скорости изменения этой энергии под воздействием вибрации получены аналитические зависимости для расчета основных параметров, характеризующих распределение сыпучего материала относительно наклонного вибрирующего лотка.

3 Разработаны математические модели псевдонепрерывного и дискретного движения порции сыпучего материала по наклонному вибрирующему лотку, соединения отдельных порций в непрерывный поток и смешение под действием вибрации. На базе этих моделей создана имитационная модель процесса непрерывного приготовления многокомпонентных смесей, позволяющая прогнозировать качество готовой смеси.

4 На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложены новые способы непрерывного дозирования и смешения, а также устройства, которые повысили точность непрерывного дозирования и качество готовой смеси. На базе математической модели процесса преобразования отдельных порций в непрерывный поток и имитационной модели процесса смешения разработана методика, алгоритм и программное обеспечение для расчета основных режимных и геометрических параметров вибрационной установки для приготовления многокомпонентных смесей.

5 Разработана и создана вибрационная установка для приготовления многокомпонентной смеси, которая позволила уменьшить время смешения 2 раза и обеспечить стабильное достижение требуемого качества смеси.

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$A, T$  – соответственно амплитуда и период полуволны синусоиды, описывающей открытую поверхность порции сыпучего материала, м;  $A_0$  – амплитуда полуволны синусоиды, описывающей открытую поверхность порции сыпучего материала после загрузки материала на лоток, м;  $A_{0L}$  – амплитуда колебаний лотка на загрузочном краю, м;  $a_0$  – начальное ускорение движения центра тяжести порции сыпучего материала,  $\text{м/с}^2$ ;  $C_{i+1,m-1}$  – концентрация ключевого компонента в  $(i + 1)$  подслое после  $(m - 1)$  перехода;  $C(C)_{i+1,k-1}$  – концентрация компонента  $C$  в ячейки  $i + 1$  после  $k - 1$  перехода;  $C(B)_{i+1,k-1}$  – концентрация компонента  $B$  в ячейки  $i + 1$  после  $k - 1$  перехода;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $K, k_A, k_a, K_P, K_\beta$  – коэффициенты пропорциональности;  $L_C$  – длина лотка до шарнира, м;  $m$  – масса порции сыпучего материала, кг;  $P_0$  – вероятность перехода частиц ключевого компонента в подслое, находящийся ближе к центру циркуляции, при нулевой концентрации в нем ключевого компонента;  $P_{0AC}$  – вероятность перехода компонента  $A$  в ячейку, содержащую только компонент  $C$ ;  $P_{0AB}$  – вероятность перехода компонента  $A$  в ячейку, содержащую только компонент  $B$ ;  $P_{0BC}$  – вероятность перехода компонента  $B$  в ячейку, содержащую только компонент  $C$ ;  $Q_A, Q_B$  – соответственно производительности дозаторов по компоненту  $A$  и  $B$ , кг/с;  $\delta Q_A, \delta Q_B$  – соответственно отклонения по производительности дозаторов по компоненту  $A$  и  $B$ , кг/с;  $S$  – путь, пройденный центром тяжести порции сыпучего материала вдоль лотка, м;  $t$  – время, с;  $\Delta t$  – интервал времени отбора проб, с;  $V_0$  – начальная скорость центра тяжести порции сыпучего материала, м/с;  $V(\alpha_0)$  – средняя скорость движения центра тяжести порции сыпучего материала при угле наклона лотка к горизонту  $\alpha_0$ , м/с;  $V_{\text{кл},i,k}$  – объем ключевого компонента в  $i$ -м подслое после  $k$ -го перехода;  $y''(t)$  – функция изменения ускорения тела в направлении, перпендикулярном к поверхности лотка;  $\alpha$  – угол наклона лотка к горизонту, рад;  $\beta$  – коэффициент затухания;  $\beta_0$  – начальное значение коэффициента затухания;  $\beta(S)$  – функция изменения коэффициента затухания по длине лотка.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1 Барышникова С.В. Использование двухстадийной технологии для порционного дозирования сыпучего материала / С.В. Барышникова, А.А. Осипов // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Вып. 8. Тамбов, 2001. С. 93 – 97.

2 Барышникова С.В. Пути совершенствования порционного дозирования сыпучего материала / С.В. Барышникова, А.А. Осипов // VI науч. конф. ТГТУ: Материалы конф. Тамбов, 2001. С. 226.

3 Барышникова С.В. Использование имитационных моделей для оценки точности весовых дозаторов / С.В. Барышникова, А.А. Осипов, Д.В. Филимонов // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Вып. 11. Тамбов, 2002. С. 54 – 57.

4 Pershin V. Manufacturing of f multicomponent mixture with usage of two-stage technology of feeding / V. Pershin, S. Barishnikova, A. Osipov, D. Filimonov // 15<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2002. Praha. 2002. P. 5.219.

5 Першин В.Ф. Моделирование процесса непрерывного двухстадийного дозирования порошкообразных материалов / В.Ф. Першин, С.В. Барышникова, А.А. Осипов, Д.В. Филимонов // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XV Международ. науч. конф. В 10 т. / Под общ. ред. В.С. Балакирева; ТГТУ. Тамбов, 2002. Т. 3. Секция 3. С. 12 – 14.

6 Каляпин Д. К. Совершенствование технологии двухстадийного дозирования сыпучих материалов / Д.К. Каляпин, А.А. Осипов, С.В. Барышникова // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Вып. 13. Тамбов, 2003. С. 46 – 49.

7 Приоритет на заявку № 109774. Способ непрерывного дозирования сыпучих материалов и устройство для его осуществления / В.Ф. Першин, С.В. Барышникова, Д.К. Каляпин, А.А. Осипов; принято 07.04.2003.

8 Приоритет на заявку № 113033. Способ приготовления многокомпонентных смесей и устройство для его реализации / В.Ф. Першин, С.В. Барышникова, Д.К. Каляпин, А.А. Осипов; принято 05.05.2003.

9 Осипов А.А. Моделирование процесса движения сыпучего материала на вибрлотках / А.А. Осипов, С.В. Барышникова // Интернет-конференция «Творчество молодых в науке и образовании»: Ч. 1. Тезисы. М.: МГУИЭ, 2003. С. 73.

10 Осипов А.А. Использование технологии двухстадийного дозирования для приготовления многокомпонентных смесей / А.А. Осипов // IX Науч. конф. ТГТУ: Пленарные докл. и кр. тез. Тамбов, 28 – 30 апреля 2004. С. 68

11 Осипов А.А. Приготовление многокомпонентных смесей на основе технологии двухстадийного дозирования / А.А. Осипов, А.И. Шершукова // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Вып. 15. Тамбов, 2004. С. 45 – 48.

12 Осипов А.А. Математическое описание движения сыпучего материала на наклонном вибрирующем лотке / А.А. Осипов, С.В. Першина // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Вып. 15. Тамбов, 2004. С. 81 – 84.