

УДК 628.023

ДОЗИРОВАНИЕ И СМЕШИВАНИЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ: КРАТКИЙ ОБЗОР РОССИЙСКИХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Осипов А.А., Першина С.В.

ФГБОУ ВПО Тамбовский государственный технический университет, Россия (392000, г. Тамбов, ул. Советская 106)pershin.home@mail.ru

Проведен анализ научных исследований процессов дозирования и смешивания, проведенных в России за последние 40 лет. Поскольку интенсивность и эффективность данных процессов зависит от углов и коэффициентов трения, а также от характера движения сыпучего материала, в обзоре рассмотрены также методы определения указанных характеристик. Рассмотрены устройства для экспериментального определения углов и коэффициентов трения сыпучих материалов. Даны основы энергетического принципа описания движения сыпучего материала в потенциальных силовых полях. Проведен анализ способов смешивания сыпучих материалов. Особое внимание уделено явлению сегрегации частиц и обсуждаются пути использования данного явления для интенсификации процесса смешивания. Обсуждается идея упорядоченного смешивания. Основное внимание уделено точности дозирования. Отмечено, что основным недостатком систем непрерывного дозирования – динамические воздействия на весовой датчик. Рассмотрена технология двухстадийного дозирования и ее принципиальное отличие от традиционных способов. При анализе перспектив использования данной технологии отмечается: существенное повышение точности, простота и надежность аппаратного оформления. Обсуждаются преимущества двухстадийного дозирования при реализации процессов смешивания.

Ключевые слова: сыпучий материал, коэффициенты трения, энергетический принцип, смешивание, дозирование, точность дозирования.

FEEDING AND MIXING OF BULK SOLIDS: A BRIEF OVERVIEW OF RUSSIAN RESEARCH

Osipov A.A., Pershina S.V.

Tambov state technical university, Russia (392000, Tambov, st. Sovetskaj 106)pershin.home@mail.ru

The analysis of research processes dosing and mixing is carried out in Russia over the last 40 years. As the intensity and effectiveness of these processes depends on the angles and coefficients of friction, as well as on the nature of the bulk solids movement, the review also considered methods of determining these characteristics. Reviewed devices for experimental determination of angles and coefficients bulk solids friction. Presented fundamentals of energy principle describing the motion of bulk solids in a potential force fields. The analysis of ways of mixing bulk materials is carried out. Special attention is paid to particles segregation, and its application in the intensifying of the mixing process. The idea of ordered mixing is discussed. The focus is on the accuracy of feeding. It is noted that the main drawback of continuous feeding systems are dynamic effects on the weight sensor. The technology of two-stage feeding and its fundamental difference from traditional methods is studied. It is stressed that the prospects of using this technology is gives, a significant increase in accuracy, simplicity and reliability of instrumentation. The advantages of two-stage feeding with the implementation of the mixing process are discussed.

Keywords: bulk solids, the coefficients of friction, energy principle, mixing, feeding, accuracy of feeding.

Сыпучие материалы используются практически во всех отраслях промышленности и в сельском хозяйстве [3, 4, 11, 27, 28]. Процесс смешивания является одной из ключевых операций многих технологических процессов. Смешивание всегда сопровождается процессом дозирования компонентов, поэтому эти два процесса целесообразно рассматривать вместе. Интенсивность процесса смешивания и качество готовой смеси существенно зависят от физико-механических свойств компонентов и характера их движения в рабочем объеме смесителя. Таким образом, при анализе научных исследований процессов

дозирования и смешивания необходимо также рассматривать исследования физико-механических свойств сыпучих материалов и их движение в рабочем объеме смесителя.

Физико-механические характеристики сыпучих материалов

Обычно выделяют четыре группы свойств: механические, физические, химические, технологические. Углы и коэффициенты трения, которые оказывают наиболее сильное влияние на движение сыпучего материала можно отнести, как к физико-механическим, так и к технологическим характеристикам. В настоящее время на практике наиболее часто используют следующие углы и коэффициенты трения: угол естественного откоса; угол обрушения; угол трения движения; угол трения покоя; статический коэффициент внешнего трения; кинематический коэффициент внешнего трения; коэффициент внутреннего трения.

Углом естественного откоса называется угол между горизонтальной поверхностью и образующей конуса насыпанного на нее сыпучего материала. Углом обрушения называется угол, образующийся при обрушении слоя в результате удаления подпорной стенки. Широкое использование этих характеристик в технике для определения наклона стенок при конструировании бункеров, контейнеров, воронок, течек, желобов, хранилищ [28] объясняется простотой и наглядностью их измерения. Основным недостатком большинства приборов заключается в том, что формирование углов естественного откоса и обрушения происходит на жестком гладком основании, а не слое частиц. Кроме этого сложно обеспечить постоянную скорость движения частиц при формировании конуса из сыпучего материала. Указанные недостатки устранены специально разработанных способах и устройствах [37, 38].

Достаточно часто для расчетов параметров движения сыпучего материала используют углы и коэффициенты трения покоя и движения [24]. Эти углы определяют на устройстве [39], которое состоит из барабана, на прозрачной торцовой стенке которого установлен подвижный флажок, а на основании – угловая шкала. Барабан приводится во вращение приводом. Внутри барабана установлена лопасть, ссыпаящий край которой совпадает с осью вращения барабана. Анализируемый материал засыпают в барабан и включают привод вращения. После того, как барабан совершает 2–3 оборота, привод вращения выключают в тот момент, когда начинается ссыпание материала с лопасти. По окончанию ссыпания материала с лопасти по шкале определяют угол наклона открытой поверхности материала к горизонту – угол трения движения α_d . Далее, перемещают флажок в точку пересечения линии открытой поверхности с обечайкой барабана и повторно включают привод барабана. Привод выключают в тот момент, когда начинается ссыпание материала с лопасти. По положению флажка определяют угол наклона открытой поверхности материала к горизонту, при котором началось ссыпание материала – это угол трения покоя $\alpha_{п}$. Эти углы можно

определять и во вращающихся непрерывно лабораторных установках [40, 41]. Коэффициенты трения движения и покоя используются: при описании движения во вращающихся барабанах как круглого [19], так и произвольного поперечного сечения [20]; при моделировании процессов смешивания [21, 22], гранулирования [14], классификации [23], дозирования [14].

Для определения внутреннего трения зернистого материала используют прибор Дженике [9], который состоит из трех кольцевых секций, установленных одна на другую. Материал засыпают в секции и выравнивают по краю верхней секции. Далее на материал через прижимную плиту передают усилие для его уплотнения, равное последующей нагрузке затем 10-15 раз поворачивают прижимную плиту вокруг вертикальной оси на угол 30-45 градусов, добиваясь однородного уплотнения материала в секциях. После этого верхнюю секцию сдвигают вместе с материалом. Далее на материал укладывают опорную плиту, на которую устанавливают гирю с определенным весом. В результате действия вертикальной нагрузки P , в зернистом материале возникают определенные нормальные напряжения. Посредством винтового привода на верхнюю секцию передают сдвигающее усилие, величина которого фиксируют динамометром. В результате действия горизонтальной нагрузки G , в зернистом материале возникали касательные напряжения. Величину усилия G увеличивают до тех пор, пока верхняя секция сдвинется относительно нижней. Коэффициент внутреннего трения рассчитывают исходя из соотношений горизонтальной и вертикальной нагрузок.

Для определения кинематического коэффициента внешнего трения разработана информационно-измерительная система [42], в которой секция устанавливается на тележку и соединяется через пружину и датчик силы с неподвижной опорой. Тележка соединена с лебедкой, которая обеспечивает скольжение сыпучего материала относительно тележки с постоянной скоростью, что является необходимым условием при определении кинематического коэффициента трения.

Движение сыпучего материала

В настоящее время при описании движения сыпучего материала во вращающемся барабане используется либо "одночастичный" подход, при котором рассматривается равновесие отдельной частицы, либо метод "вязких течений" [24], согласно которому движение сыпучего материала рассматривается как течение вязкопластичной среды. Первый подход дает хорошие результаты только при описании свободного движения, а основной недостаток второго подхода – необходимость определения эмпирических коэффициентов на лабораторных установках. Для устранения этих недостатков была выдвинута гипотеза [19] о том, что система, состоящая из большого числа контактирующих друг с другом частиц,

находящихся в поле потенциальных сил, стремится, а при установившемся режиме движения достигает такого состояния, при котором ее потенциальная энергия минимальна. Экспериментально данная гипотеза была проверена, как для вращающихся смесителей, так и для вибрирующих.

Смешивание сыпучих компонентов

Первая, научно обоснованная монография по смесителям была написана профессором Макаровым Ю.И. [12], которая фактически положила начало использованию математического аппарата случайных марковских процессов при моделировании процессов смешивания. Данный подход успешно развивается и используется, как для периодических [16, 17], так и непрерывных [24, 25, 32, 43] процессов смешивания. Математические модели, построенные на основе марковских цепей легко реализуются на ЭВМ, что позволяет организовывать численные эксперименты и определять рациональные режимные и геометрические параметры смесителей [1, 33].

Особое место в исследовании и моделировании процесса смешивания занимает сегрегация, т.е. разделение компонентов. До недавнего времени сегрегация при смешивании считалась однозначно отрицательным явлением, но в конце прошлого века принципиально новые решения в организации процессов смешивания, в которых явление сегрегации используется для интенсификации процесса смешивания и гарантированного повышения качества готовой смеси [44, 45]. Основная идея данных способов и устройств заключается в том, что загрузку ключевого компонента (компонента склонного к сегрегации) осуществляют в область рабочей камеры, расположенную диаметрально противоположно той области, где в результате длительного смешивания концентрируется этот компонент. Указанные способы могут быть реализованы в циркуляционных смесителях, как с вращающейся рабочей камерой [31, 35, 43], так и с неподвижной камерой, вращающимися рабочими органами [5, 6, 7, 8].

Еще одним перспективным направлением повышения качества смешивания и снижения энергозатрат является упорядоченное смешивания, когда компоненты загружаются в строго определенном порядке, например слоями [29, 30].

Особо следует отметить, что математические модели процесса смешивания входят в модели процессов гранулирования и классификации [13, 18, 36].

Дозирование сыпучих материалов

Изменение интенсивности загрузки компонентов и организация упорядоченного смешивания требует принципиально новых решений в способах и устройствах для непрерывного весового дозирования [14]. Кроме высокой точности дозатор должен обеспечивать требуемое изменение производительности. Серийно выпускаемые дозаторы не

удовлетворяют данным требованиям, поэтому был предложен способ двухстадийного дозирования [46]. Сущность данного способа заключается в том, что на первой стадии порционным весовым дозатором формируются отдельные порции сыпучего материала весом ΔP , а на второй стадии эти порции через промежутки времени ΔT подаются в устройство, которое преобразует эти порции в непрерывный поток. Производительность непрерывного дозирования $Q = \Delta P / \Delta T$. Повышение точности дозирования происходит за счет того, что при формировании порций нет динамических воздействий на весоизмерительный датчик. Поскольку производительность непрерывного дозирования зависит от веса одной порции и промежутка времени можно легко и практически в любое время ее изменить. Для реализации способа разработан ряд конструкций [48, 49, 50].

Выводы

Для повышения эффективности процессов дозирования и смешивания сыпучих материалов необходимо:

- разрабатывать новые способы и устройства для экспериментального определения кинематических коэффициентов внутреннего трения сыпучих материалов;
- совершенствовать энергетический подход к описанию движения сыпучих материалов в сложных силовых полях;
- продолжить исследования по организации упорядоченного смешивания компонентов склонных к сегрегации;
- провести исследования весового порционного дозирования с целью повышения точности двухстадийного весового непрерывного дозирования сыпучих материалов и упрощения аппаратного оформления данной технологии.

Список литературы

1. 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.
2. Борщев В.Я. Основы безопасной эксплуатации технологического оборудования химических производств Борщев В.Я., Кормильцин Г.С., Промтов М.А., Тимонин А.С. Учебное пособие. – Тамбов: Издательство ТГТУ, 2011. – 188 с.
3. Генералов М.Б. Основные процессы и аппараты технологии промышленных взрывчатых веществ — М.: Академкнига, 2004. — 397 с.
4. Генералов, М. Б. Механика твердых дисперсных сред в процессах : учеб. пособие для вузов. Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. - 592 с.

5. Демин О. В. Приготовление смеси сыпучих материалов в двухвальных лопастных смесителях/О.В.Демин, Д.О.Смолин, В.Ф.Першин// Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2012. №4. С.6-8.
6. Демин О.В. Интенсификация смешивания сыпучих материалов в лопастном смесителе/ О.В.Демин, Д.О.Смолин, В.Ф.Першин // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2012. Т.55. №8. С. 108-111.
7. Дёмин О.В. Оперативное управление процессом смешивания / О.В. Дёмин, О.Д. Смолин, В.Ф. Першин // Вопросы современной науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского. – 2012. - №4. – С. 356-366.
8. Демин О.В., Першин В.Ф., Свиридов М.М. Управление технологическим процессом в одновальном лопастном смесителе// Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2009. - № 7. – С. 16-17.
9. Ди Дженнаро А.И., Першина С.В., Першин В.Ф. Определение коэффициента внутреннего трения сыпучих материалов при различных значениях плотности // Вопросы современной науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского. – 2011. - №3. – С. 366-368.
10. Классен, П.В., Грищаев И.Г. Основы техники гранулирования / М. : Химия, 1982. – 272 с.
11. Машиностроение : энциклопедия. Т. IV–12 : Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. / М.Б. Генералов [и др.] ; под общ. ред. М.Б. Генералова. – М. : Машиностроение. – 2004. – 832 с.
12. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М., 1973. 215 с.
13. Минаев, Г.А., Першин В.Ф. Моделирование процесса гранулирования методом окатывания//Теорет. основы хим. технологии.–1989.– Т. 24, № 1. – С. 91–97.
14. Першина С.В. Весовое дозирование зернистых материалов: монография / С.В.Першина, А.В.Каталымов, В.Г.Однолько, В.Ф.Першин. - М.: Машиностроение, 2009.-260с.
15. Першина С.В. К вопросу промышленного использования углеродных наноматериалов / С.В. Першина, В.Ф. Першин, А.Г. Ткачев, А.И. Шершукова А.И.// Приборы. Издатель: СОО «Международное НТО приборостроителей и метрологов». 2007. № 10. – С. 57-60.
16. Першин В. Ф. Моделирование процесса смешения сыпучего материала в поперечном сечении вращающегося барабана // Теорет. основы хим. технол. 1986.-Т. 20, №4. С. 508-513.
17. Першин, В.Ф. Модель процесса смешивания сыпучего материала в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана // Теорет. основы хим. технологии. – 1989. – Т. XXIII, № 3.– С. 370–377.
18. Першин, В.Ф. Моделирование процесса классификации в барабанном грохоте // Теорет. основы хим. технологии.–1989.–Т. XXIII, № 4. – С. 499–505.

19. Першин, В.Ф. Энергетический метод описания движения сыпучего материала в поперечном сечении гладкого вращающегося цилиндра // Теорет. основы хим. технологии. – 1988. – Т. XXII, № 2. – С. 255–260.
20. Першин, В.Ф., Минаев Г.А. Использование энергетического подхода при определении режимов движения сыпучего материала во вращающемся барабане // Теорет. основы хим. технологии. – 1989. – Т. XXIII, № 5. – С. 659–662.
21. Першин, В.Ф. Моделирование процесса смешения сыпучего материала в поперечном сечении вращающегося барабана // Теорет. основы хим. технологии. – 1986. – Т. XX, № 4. – С. 508–513.
22. Першин, В.Ф. Модель процесса смешивания сыпучего материала в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана // Теорет. основы хим. технологии. – 1989. – Т. XXIII, № 3.– С. 370–377.
23. Першин, В.Ф. Моделирование процесса классификации в барабанном грохоте // Теорет. основы хим. технологии.–1989.–Т. XXIII, № 4. – С. 499–505.
24. Першин В.Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В.Ф.Першин., С.В.Першина, В.Г.Однолько. - М.: Машиностроение, 2009.-220с.
25. Першин В.Ф., Селиванов Ю.Т. Моделирование процесса смешивания сыпучих материалов в циркуляционных смесителях непрерывного действия // Теорет. основы хим. технологии. – 1989. – Т. XXIII, № 3.– С. 370–377.
26. Пестов, И. Е. Физико-механические свойства зернистых и порошкообразных химических продуктов / И.Е. Пестов. – М. : Изд-во АН СССР, 1947. – 33 с.
27. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. В 5 т. Т. 2. Механические и гидромеханические процессы / Д.А.Баранов [и др.]; под ред. А.М.Кутепова.–М. : Логос, 2001. – 600 с.
28. Рухов, А. В., Аладинский А.А. Разработка испарителя жидких и сжиженных углеродсодержащих веществ для технологической схемы производства углеродных волокнистых наноматериалов // Интернет-журнал «Наукоеведение». – 2013. – № 4 (17) [Электронный ресурс]. – URL : <http://naukovedenie.ru/PDF/86tvn413.pdf>, свободный – Загл. с экрана.
29. Свиридов М.М., Першин В.Ф. Конструкции смесителей сыпучих материалов, обеспечивающих стабильный уровень качество смеси // Химическое и нефтегазовое машиностроение, № 8, 1999. - С.13-15.
30. Свиридов М.М., Першин В.Ф. Упорядоченный способ приготовления смеси // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. Иваново. 2008. – Том 51, № 6. – С 66-69.

31. Селиванов Ю.Т., Першин В.Ф. Некоторые аспекты практического использования циркуляционных смесителей сыпучих материалов // Химическая промышленность сегодня. 2011. № 2. С. 51-56.
32. Селиванов Ю.Т., Першин В.Ф. Исследование влияния осевого движения на процесс непрерывного смешивания сыпучего материала во вращающемся барабане // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология, 2003. Т.46. № 7. С. 42-45.
33. Селиванов Ю.Т. Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств. – монография/ Ю.Т. Селиванов, В.Ф. Першин М.: Машиностроение-1, 2004. 119 с.
34. Селиванов Ю.Т., Дурнев А.С., Поляков Б.Е. Повышение эффективности работы циркуляционных смесителей за счет упорядоченной загрузки компонентов // Вестник ТГТУ. 2012. Т. 18. № 2. С. 396-404.
35. Селиванов Ю.Т., Першин В.Ф., Дурнев А.С. Расчет регламента загрузки компонентов в циркуляционные смесители // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2011. №1. С.16-19.
36. Ткачев А.Г., Маслов С.В., Першин В.Ф. Механическая классификация катализаторов для производства углеродных наноматериалов /А.Г. Ткачев, // Вестник ТГТУ, 2007, Т.13. № 3. - С. 741-746.
37. А.с. 1226000 СССР, МКИ³ G 01B 3/56. Устройство для определения углов естественного откоса сыпучих материалов / В.Ф. Першин, Е.А. Мандрыка, А.Н. Цетович (СССР). – № 3776750/25–28 ; заявл. 30.07.84 ; опубл. 23.04.86, Бюл. № 15.
38. А.с. 1472757 СССР МКИ³ G 01 B 11/26. Способ определения угла естественного откоса сыпучего материала / Н.М. Казанский, А.Д. Ишков, В.Ф. Першин, А.Н. Цетович, Е.А. Мандрыка (СССР). – № 4106564/25–28 ; заявл. 22.05.86 ; опубл. 15.04.89, Бюл. № 14.
39. А.с. 1083069 СССР МКИ G 01B 5/24. Устройство для определения углов естественного откоса и обрушения сыпучих материалов / М.П. Макевнин, В.Л. Негров, В.Ф. Першин, М.М. Свиридов (СССР). – № 3531902/25–28 ; заявл. 31.12.82 ; опубл. 30.03.84, Бюл. № 12.
40. А.с. 1478101 СССР МКИ G 01 N 19/02. Способ определения коэффициента трения движения сыпучего материала / В.Ф. Першин, Г.А. Минаев (СССР). – № 4191624/25–28 ; заявл. 06.02.87 ; опубл. 07.05.89, Бюл. № 17.
41. А.с. 1430819 СССР МКИ G 01 N 3/56. Способ определения угла трения покоя сыпучих материалов / В.Ф. Першин, Г.А. Минаев, В.Л. Негров (СССР). – № 4190913/25–28 ; заявл. 04.02.87 ; опубл. 15.10.88, Бюл. № 38.
42. Патент 95843 РФ, U1, МПК G01F 1/00. Информационно-измерительная система для определения коэффициента внешнего трения сыпучего материала / С.В.Першина, А.И. Ди Дженнаро, С.В.Мищенко, С.А. Егоров, В.Ф.Першин. 2010. Бюл. №19.

43. Патент 2478420 РФ, С2, Способ непрерывного приготовления многокомпонентных смесей и устройство для его реализации . МПК В01F 3/18, Першин В.Ф., Селиванов Ю.Г., Дурнев А.С.. 2013. Бюл. № 10.
44. А.с. 1326323 СССР, МКИ В01 F 9/02. Способ приготовления смеси сыпучих материалов/В.Ф. Першин (СССР).- № 3834337/31-26; Заявлено 02.01.85; Оpubл. 30.07.87, Бюл. № 28.
45. А.с. 1297895 СССР МКИ В01 F3/18. Способ приготовления многокомпонентных смесей сыпучих материалов / В. Ф. Першин (СССР) - № 3861237/31-26; Заявлено 02.01.85; Оpubл. 23.03.87, Бюл. №11.
46. Пат. 2138783 Российская федерация, С1, МКИ G 01 F 11/00. Способ непрерывного дозирования сыпучих материалов / В.Ф. Першин, С.В. Барышникова; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. Техн. ун-т.- № 98110906/28; заявл. 02.06.98; опубл. 27.09.99, Бюл. № 27.
47. Пат. 2251083 Российская федерация, С2, МКИ G 01 F 11/00 Способ непрерывного дозирования сыпучих материалов устройство для его осуществления / В.Ф.Першин, С.В.Барышникова, Д.К.Каляпин, А.А.Осипов; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. Техн. ун-т.-№ 2003109774/28; заявл. 07.04.03; опубл. 27.04.05, Бюл. № 12.
48. Патент 102110 РФ, U1, МПК G01F 11/00. Устройство для непрерывного весового дозирования сыпучих материалов // С.В. Першина, А.И. Ди Дженнаро, А.С.Егоров, А.А. Осипов, В.Г. Однолько, В.Ф. Першин. 2011. Бюл. №4.
49. Патент 113353 РФ, U1, МПК G01F 11/00. Устройство для непрерывного двухстадийного дозирования углеродных наноматериалов // С.В. Першина, А.И. Ди Дженнаро, В.Г.Однолько В.Г., А.А. Осипов, В.Ф. Першин, П.М. Явник. 2012. Бюл. № 4.
50. Патент 131477 РФ, U1, МПК G01F 11/00, Устройство для двух-стадийного непрерывного дозирования сыпучих материалов // С.В. Першина С.В., С.А. Егоров С.А., В.Г. Однолько В.Г., В.Ф. Першин, П.М. Явник . 2013. Бюл. №24.

Рецензенты:

Рухов А.В, д.т.н., зам. генерального директора по науке ООО «Нанотехцентр», г.Тамбов;
Ярцев В.П., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВПО Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов.