

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПЕРИОДИЧЕСКОГО СМЕШИВАНИЯ

В статье представлено применение метода стохастических функций к описанию процессов периодического смешивания дисперсных материалов. На основе экспериментальных исследований определены параметры, входящие в разработанную модель. Путём перебора найдены коэффициенты матрицы переходных вероятностей. Рассчитаны оптимальные значения коэффициентов интенсивности перехода. В результате сопоставления модельных и экспериментальных данных выявлено, что модель адекватна и погрешность расчёта является допустимой.

Периодическое смешивание, стохастическая модель, коэффициенты интенсивности смешивания.

Отличительной чертой смесеприготовительных аппаратов является их энерго- и металлоёмкость. Основные требования, предъявляемые к смесительному оборудованию – это надёжность и удобство эксплуатации, низкие удельные затраты энергии и материала, высокая производительность и хорошее сглаживание пульсаций входящих потоков материалов. В настоящее время для оптимизации и интенсификации процессов смешивания все чаще используют математическое моделирование. Аппарат математического моделирования позволяет детально описать процесс смешивания и определить его рациональные параметры, а также разработать методы оптимального проектирования и управления.

Исследование процесса смешивания включает в себя три основных этапа:

- анализ процесса смешивания как сложной системы;
- построение математических моделей процессов смешивания для смесительных аппаратов различного действия;
- идентификацию параметров и проверку адекватности математических моделей.

На первом этапе составляется общая картина процесса смешивания. Для этого рассматриваются физико-механические свойства исходных компонентов, конструкционная особенность смесителя и режимы его работы, кинетика процесса смешивания, методы загрузки исходных компонентов в смеситель, соотношение смешиваемых компонентов и т.д.

Второй этап заключается в построении математической модели, наиболее подходящей для данного аппарата и процесса. В настоящее время существует множество различных подходов, применяемых при моделировании процессов приготовления смесей. К ним относятся: эмпирические методы; методы механики сплошных сред; энтропийно-информационный подход; кибернетические методы, основанные на анализе структуры потоков с помощью функции распределения времени пребывания (ФРВП) частиц потока внутри аппарата; вероятностно-статистический с варьируемыми характеристиками (радиус нижнего основания, высота, угол конусности, количество лопастей). Качество смеси оценивается с помощью коэффициента неоднородности (вариации) V_s . В результате обработки исходного и статистического материала составляются уравнения регрессии. При по-

(стохастический) подход. В силу стохастичности природы процесса смешивания, целесообразно использовать для их описания вероятностные методы, в частности моделирование с использованием случайных функций [1]. Этот выбор обусловлен тем, что данный метод позволяет наиболее адекватно отразить кинетику протекания процесса, учесть влияние флуктуаций входящих потоков, отразить макро- и микро-смешивание материалов. Полученная математическая модель должна полно отражать картину смешивания в аппарате.

Целью работы являлась разработка математической модели и расчёт оптимальных параметров процесса смешивания с применением теории стохастических функций для смесителей центробежного типа со сложной структурой материальных потоков. В соответствии с поставленной целью решались следующие основные задачи:

- моделирование на основе стохастических функций процесса смешивания в смесителях центробежного типа с различной организацией материальных потоков;
- разработка методов идентификации неизвестных численных параметров моделей;
- реализация математической модели с помощью численных методов моделирования и проверка ее на адекватность реальному процессу;
- экспериментальное исследование новой конструкции центробежного типа с организацией направленного движения материальных потоков.

Идентификация параметров и проверка адекватности математических моделей на основе экспериментальных исследований проводится по определённому алгоритму. В ходе проведения полнофакторного эксперимента варьируются следующие параметры: максимальная скорость материала в потоке, требуемая концентрация ключевого компонента в смеси и отношение дисперсностей частиц смешиваемых компонентов. Эксперимент проводится на смесителе периодического действия центробежного типа, ротор которого состоит из плоского диска и конуса мощи критерия Стьюдента оценивалась значимость коэффициентов полученного уравнения регрессии (при его нормированном виде). Полученная модель проверяется на адекватность при помощи критерия Фишера.

Экспериментальные исследования проведены на опытно-промышленной конструкции смесителя периодического действия [2] и на его модернизированной модели. Модернизация заключалась в установке на роторе аппарата лопастей с вырезами и выполнении перепускных окон на нижней поверхности конуса. За счет этих нововведений были образованы три новых потока материала, с помощью которых организовывалось наложение потоков, их пересечение и рециркуляция материала.

Смеситель, изображенный на рис. 1, работает следующим образом. В корпусе 1 на валу 2 закреплен полый усеченный конус 3 с двумя симметрично расположенными окнами 4. При вращении конуса 3 частицы материала под действием центробежной силы движутся по его внутренней поверхности вверх и попадают в кольцевое пространство между конусом и корпусом 1. Новые порции материала поступают внутрь конуса из кольцевого пространства через окна 4. Лопастная мешалка 5, вращаясь вместе с конусом, увеличивает подвижность материала, находящегося в нижней части корпуса 1, способствует его проходу через окна 4 во внутрь корпуса. Основная часть процесса смешения протекает при его подъеме по внутренней поверхности конуса вследствие разных траекторий движения частиц и в кольцевом пространстве благодаря их перераспределению во время полета, опускания и вращения под действием конуса лопастной мешалки.

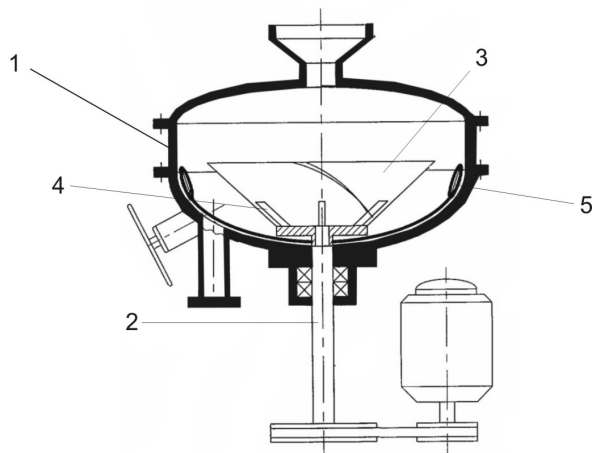


Рис. 1. Смесительный аппарат центробежного типа

Базовая конструкция ротора представляет собой гладкую коническую тарелку с небольшими узкими окнами у основания. На базе предложенных решений по улучшению конструкции ротора центробежного смесителя были созданы новые конструкции конических тарелок. Модернизированный аппарат предусматривает дополнительный возврат части материала (рецикл) с поверхности ротора за счет закрепленных на нем направляющих лопастей, имеющих профиль дуги круга, по всей длине которых выполнены вырезы в верхней части и перепускные отверстия в нижней, а также создание опережающих потоков за счет перепускных отверстий в нижней части ротора. В результате экспериментальных ис-

следований проверены ранее существующие конструкции ротора, также проведены эксперименты с новыми конструкциями тарелок.

Экспериментальные исследования базовой и модернизированной конструкций проводились при различных скоростях вращения ротора. Отмечено, что при увеличении скорости вращения ротора качество смеси улучшалось. За начальную скорость вращения была принята частота вращения ротора $8,33 \text{ с}^{-1}$ (500 мин^{-1}), максимальная рассматриваемая частота $16,7 \text{ с}^{-1}$ (1000 мин^{-1}). Первый ряд опытов проводился на гладкой конической тарелке без окон и лопастей, второй – на гладкой конической тарелке с небольшими узкими окнами у основания, третий – на гладкой конической тарелке с выгрузочными окнами у основания и с лопастями, четвертый – на конической тарелке с лопастями и выгрузочными окнами за ними и у основания. Продолжительность смешивания – 5 минут. Далее через расстояние 20 мм отбирались пробы из рабочей зоны смесителя в количестве 30 штук, массой 10 грамм.

Экспериментальное определение коэффициента неоднородности смеси проводилось по методике [3]. Полученные экспериментальным путем коэффициенты неоднородности сопоставлялись с рассчитанными теоретическими значениями.

Модельное значение коэффициента неоднородности рассчитано следующим образом. При построении математической модели с помощью теории стохастических функций сначала описывают сложную систему в виде размеченного графа, включающего все состояния системы с заданными интенсивностями перехода. Число состояний системы зависит от сложности рассматриваемой модели процесса. Далее, используя построенный граф, описывающий процесс, составляется система линейных уравнений, решение которой позволяет получить искомые величины. Решение системы линейных уравнений организовано на ЭВМ с помощью прикладных пакетов Mathcad и Maple. Условное время процесса смешивания разбито на 20 шагов.

В результате проведенных математических расчетов на разных этапах смешивания были получены различные значения коэффициента неоднородности смеси. На шаге 2 смешивания коэффициент неоднородности смеси модернизированной конструкции в рабочих зонах составляет от 50-70 % (рис. 2а). В базовой конструкции в некоторых зонах он достигает 80 %. На шаге 5 коэффициент неоднородности в модернизированном смесителе уже во всех рабочих зонах не превышал 30 %, в базовой конструкции в пятой зоне коэффициент неоднородности достигает 43% (рис. 2б). Таким образом, уже на пятом шаге условного времени процесса смешивания модернизированная конструкция во всех рабочих зонах показала результаты смешивания лучше, чем базовая конструкция.

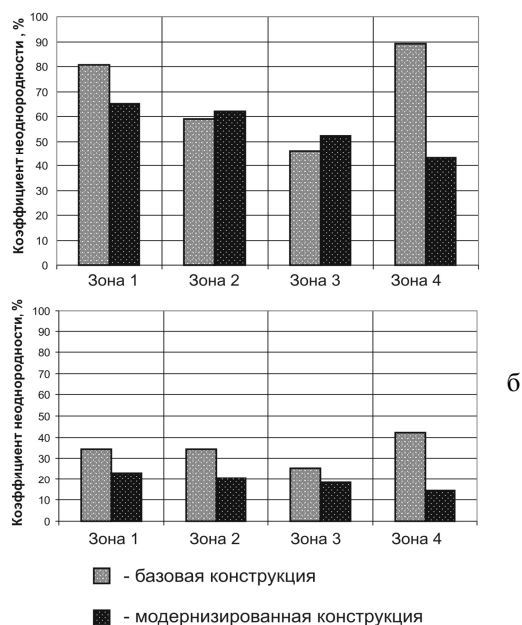


Рис. 2. Коэффициент неоднородности смеси на втором и пятом шаге смешивания

Сравнение коэффициентов неоднородности новой и базовой конструкций в рабочих зонах аппарата представлено на рис. 3. Для нового аппарата рассмотрены два набора модельных данных: средние и максимально возможные значения коэффициентов интенсивности смешивания μ_{ij} , для базового рассматривались только оптимальные значения коэффициентов. Все значения рассчитаны на выходе из аппарата (в пятой зоне). Из графика видно, что при максимальных значениях коэффициентов интенсивности смешивания количество смеси в рабочих зонах аппарата превышает допустимое и происходит эффект «захлебывания» аппарата.

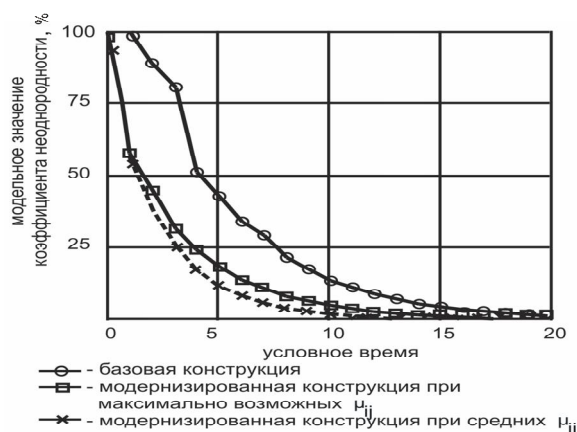


Рис. 3. Коэффициент неоднородности на выходе (в 5 зоне) по окончании процесса смешивания

Оптимальные коэффициенты смешивания для новой конструкции были получены при помощи решения задачи оптимизации. Была поставлена и решена задача минимизации коэффициентов интенсивности смешивания μ_{ij} . По полученным значениям

строилась поверхность оптимизации. Эти значения однозначно определены, что позволяет утверждать оптимальности полученного решения для построенной математической модели

Полученные в результате проведения эксперимента данные сопоставлялись расчётным данным (рис. 4). Для модернизированной конструкции периодического действия погрешность расчета коэффициента неоднородности экспериментальным и расчётным путем составила от 4,5 до 14 %.

Наблюдается тенденция уменьшения значений коэффициента неоднородности при увеличении частоты вращения ротора. Максимальная рекомендуемая скорость вращения ротора на модернизированном аппарате 1000 об/мин (16,7 об/сек). Дальнейшее увеличение частоты вращения ротора нерационально ввиду сильной запыленности и измельчения исходного сырья конструктивными элементами аппарата. Наихудший результат смешивания получен при использовании гладкого конуса, без окон и лопастей. Наилучший результат получен при смешении на конусе с лопастями и окнами за ними и у основания. Средние результаты показали эксперименты на следующих конусах: с окнами у основания без лопастей и с окнами у основания и за лопастями. Итоги экспериментов показали, что на процесс смешивания наиболее сильно влияют следующие факторы: частота вращения ротора, скорость и равномерность подачи материала, физико-механические характеристики материалов и относительная ширина перепускных окон.

Проведенные комплексные исследования позволили предложить оптимальную схему движения потоков порошкообразных и мелкозернистых сыпучих материалов, которая позволила улучшить качество смеси в 1,5 раза. Результаты испытаний предложенной схемы движения сыпучих материалов показали, что обеспечивается стабильное достижение требуемого качества смеси и снижается время процесса смешения.

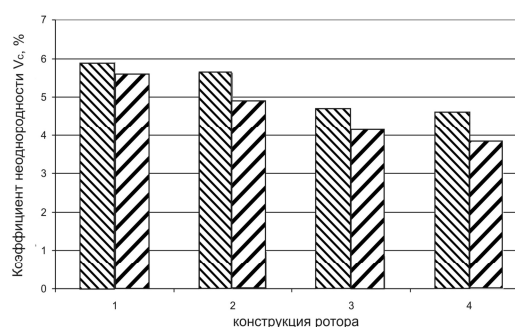


Рис. 4. Сопоставление расчётных и экспериментальных значений коэффициента неоднородности

Также следует отметить, что при разбиении реального времени процесса смешивания на 20 шагов на шагах с 1 по 4 рационально увеличивать потоки, накапливающие материал в 5 зоне аппарата, а с 5 ша-

га, уменьшить эти потоки и увеличить потоки, образующие циркуляцию материала по всему аппарату.

На пятом шаге смешивания модернизированные конструкции во всех зонах показали результаты смешивания лучше, чем базовая конструкция.

При сопоставлении значений коэффициентов неоднородности смешивания, полученных экспериментальным и расчётным путём, можно заключить, что максимальная погрешность расчётных значений коэффициента неоднородности не превышает допустимой и составляет 14 %.

Математическая модель, разработанная на основе теории стохастических функций, адекватно описывает процесс смешения сыпучего материала в центробежных смесителях периодического действия. Получены оптимальные параметры, входящие в разработанную модель: коэффициенты матрицы переходных вероятностей и значения коэффициентов интенсивности перехода. Сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов численного моделирования подтвердил адекватность разработанной математической модели реальному процессу смешивания.

Список литературы

1. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения – М.: Высшая школа, 2000. - 480с.
2. Патент N 2311951 Российская Федерация: МПК В 01 F 7/26, В28 С5/16 – 2006105599/15 Центробежный смеситель–диспергатор / Иванец В.Н., Бакин И.А., Чечко С.Г., Волков А.С., Маньянов В.И.; заявл. 22.02.2006; опубл. Бюл. № 34 10.12.2007 (Россия).
3. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 215 с.

ГОУ ВПО «Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности»,
650056, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

SUMMARY

O.S. Karnadud, S.G. Chechko

Definition of modelling parameters of process of periodic mixing

The article presents information on the application of a random function method for the description of processes of periodical mixing of dispersed materials. The parameters included in the created model have been determined on the bases of experimental investigations. The coefficients of transition probability matrix have been determined by means of variation. The optimum values of transition intensity coefficient have been calculated.

The resulting comparison of the model and experimental data indicates that the model is adequate and the calculation errors are permissible.

Periodic mixing, stochastic model, factors of intensity of mixing.