

И. О. ДРЕЙЕР, О. О. РЯЗАНОВА

Рижский технический университет

Г. Е. ГОЛУБЧИКОВА

Латвийский республиканский вычислительный центр коллективного пользования Госагропрома ЛССР

О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Введение

Ранее нами была предложена [1] модель поперечного перемешивания с использованием матрицы перехода P_h . Экспериментальное определение матрицы перехода представляет значительные трудности. С другой стороны можно предположить, что матрица перехода имеет определенную структуру и весьма просто рассчитывается, так как в основе блуждания частиц на горизонтальной проекции плоскости сечения $x-y$ в непрерывном случае находится диффузионный марковский процесс. Часто в качестве решения диффузионного уравнения получаются нормальные распределения или близкие к ним функции [2]. В реальных аппаратах решение затрудняется из-за сложных граничных условий на стенках аппарата. С целью исследования поперечного перемешивания были проведены эксперименты, в которых влияние граничных механизмов на вертикальных стенках исключалось.

Эксперимент

Для проведения опытов использовался (рис. 1) макет одной ступени смешения гравитационного смесителя из органического стекла с поперечным сечением 200×200 мм и смесительными элементами в виде двух рядов равносторонних уголков 20×20 мм, установленных с шагом 50 мм по горизонтали и с шагом 50 мм между рядами по вертикали.

Поперечное сечение на входе аппарата при помощи вертикальных перегородок разделялось на 16 ячеек. Для устране-

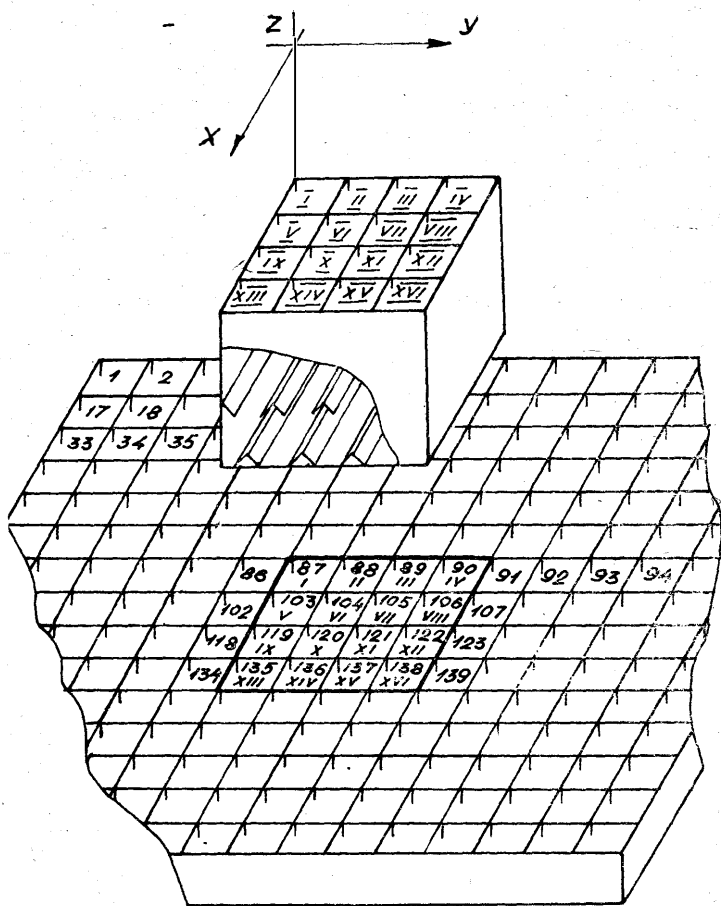


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и размещение ячеек.

ния граничных эффектов стенки корпуса ниже секции со смесительными элементами отсутствовали. Под смесительной секцией на расстоянии z (регулируемое) устанавливалась сборная секция, состоящая из ячеек такого же размера, как на входе. Количество ячеек было достаточным для сбора всего

материала, разбрасываемого в горизонтальной плоскости $x-y$.

В качестве материала использовались овес, кукуруза, полиэтиленовые гранулы $d \approx 2$ мм, силикогель $d \approx 3$ мм и другие материалы.

В первой серии опытов исследовалось распределение только одного типа материала, подаваемого в определенную ячейку на входе (через другие ячейки никакой материал не подавался).

В другой серии опытов исследовалось взаимное влияние различных материалов на их распределение: через одну ячейку подавался ключевой компонент, через остальные — инертный.

Анализ результатов — гравиметрический; в случае смешивания двух различных материалов производился ручной разбор проб или рассев через подходящие сита для отделения компонентов.

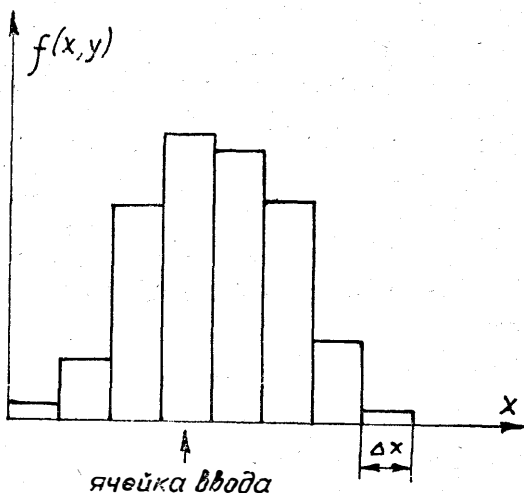


Рис. 2. Пример сечения распределения материала по оси X .

Распределение количества материала в плоскости $x-y$ формирует двумерную гистограмму с шагами Δx и Δy 50 мм. Анализировались сечения указанных распределений (рис. 2)

параллельно осям x и y . Для этого на языке БЭЙСИК была составлена программа проверки нормальности по критерию Колмогорова—Смирнова NORMH. Одновременно в программе рассчитывается целый ряд вспомогательных величин, включая средние значения, дисперсию, показатели асимметрии, эксцесса и их ошибки.

Результаты экспериментов

Анализ результатов первой серии опытов (с одним материалом) позволяет сделать однозначное заключение:

Распределение материала на выходе из секции гравитационного смесителя в горизонтальной плоскости с достаточной точностью может быть описано двухмерным нормальным распределением с центром, совпадающим с координатами подачи ключевого компонента x_0 и y_0 и параметром корреляции между x и y , равным нулю:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x-x_0}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\sigma_y} \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

Следует указать, что при подаче материала в ячейки, находящиеся в непосредственной близости от стенок смесителя, соответствие нормальному распределению хуже, чем при подаче в ячейки, удаленные от стенок. Это, очевидно, объясняется наличием граничных эффектов на вертикальных стенках корпуса в пределах секции со смесительными элементами.

Опыты с использованием двух материалов (ключевого и инертного) показывают более сложную картину. Несмотря на это, почти во всех случаях подтверждалась нормальность распределения ключевого компонента по осям x и y при уровне значимости 0,05. Из 20 проведенных опытов в 4-х случаях гипотеза о нормальности отвергалась. Это можно объяснить, с одной стороны, различием в механизме перераспределения материала. Но, с другой стороны, следует обратить внимание на то, что в этих экспериментах влияние стенок корпуса в пределах секции смешивания более выражено, чем в опытах первой серии. Следует также учитывать техническое несовершенство экспериментальной установки. Расход материала через все ячейки должен быть постоянным и одинаковым, что обеспечивалось установкой на дне питающих ячеек воронкообразного вкладыша с калиброванной щелью. Однако, точное измерение и регулирование расхода через каждую ячейку,

особенно при подаче разнородных материалов в «ключевую» и «инертные» ячейки, не представлялось возможным.

Поэтому мы считаем, что в случае взаимодействия двух и более материалов нормальность распределения остается в силе. Но необходимо учитывать, что значения σ_x и σ_y в этом случае могут быть другими, чем в опытах первой серии. На этом моменте следует остановиться особо.

При малых удельных расходах материала G (кг/м²с) частицы движутся в режиме свободного потока [3]. В этом случае длина свободного пробега частиц больше поперечного размера аппарата, т. е. частицы практически не взаимодействуют между собой. В таких условиях значения σ_x и σ_y не зависят от того, подается в соседние ячейки материал или нет. Таким образом, значения σ_x и σ_y в режиме свободного потока в условиях опытов первой и второй серии — одинаковые.

В промышленных аппаратах обычно используются более высокие удельные расходы, что приводит к режимам стесненного или сплошного потока. В этих режимах численные значения σ_x и σ_y во второй серии опытов меньше, чем получаемые в опытах с подачей материала в одну ячейку, вследствие взаимодействия (соударения) частиц.

Дисперсии σ_x и σ_y зависят также от высоты z . С увеличением z значения σ_x и σ_y асимптотически увеличиваются.

Несмотря на эти замечания, подтверждение закономерности (1) позволяет значительно сократить объем экспериментов при разработке новых гравитационных смесителей и при масштабном переходе от лабораторных установок к промышленным, так как дает возможность расчета матриц перехода для аппаратов любых размеров на основе несложной серии опытов в лабораторных условиях.

Алгоритм расчета

Для расчета матрицы перехода P_k по предлагаемой методике необходимо сделать следующее:

- 1) Провести соответствующую серию экспериментов на лабораторной установке для определения σ_x и σ_y в законе (1).
- 2) Разделить поперечное сечение проектируемого смесителя на M ячеек такого же размера, как в лабораторной установке и таким же образом ориентированных относительно смесительных элементов.
- 3) Определить координаты центров ячеек $x_{0,m}$ и $y_{0,m}$ (где

$m=1, 2, \dots, M$ — номер ячейки). Каждое фиксированное значение даст нам одну строчку матрицы перехода P_h с элементами $P_{m,1}, P_{m,2} \dots P_{m,M}$, показывающую вероятность перехода материала из ячейки номер m в ячейку номер $j=1, 2 \dots M$.

4) Рассчитать распределение материала на выходе из секции смешивания по горизонтальной плоскости без учета граничных эффектов.

Для этого горизонтальная плоскость условно делится на ячейки, аналогичные входным ячейкам, только они занимают область большую, чем поперечное сечение аппарата. Далее необходимо реализовать цикл расчетов для всех ячеек на выходе и при фиксированном номере входной ячейки $i=m$ рассчитать долю материала, попадающую в сборную ячейку с координатами центра x_j и y_j :

$$G_{m,j} = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \int_a^b dx \int_c^d f(x, y) dy, \quad (2)$$

где пределы интегрирования определяются границами j -й ячейки:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = x_j - \frac{\Delta x}{2} \\ b = x_j + \frac{\Delta x}{2} \\ c = y_j - \frac{\Delta y}{2} \\ d = y_j + \frac{\Delta y}{2} \end{array} \right. \quad (3)$$

Интеграл (2) можно рассчитать через функцию Лапласа, для которой имеются удобные аппроксимации. Следует отметить, что распределение $G_{m,j}$ для любых $m=1, 2 \dots M$ одинаковое по форме, только сдвинуто по плоскости $x-y$.

5) Далее реализуется механизм «отражения» частиц на границах (стенках) аппарата. Для этого рассмотрим наложение входных ячеек (римские цифры) на выходные (арабские цифры). Часть этого наложения представлена на рис. 1.

При работе смесителя материал, который попал в ячейки, находящиеся за пределами стенок смесителя, будет отражен

от стенок и отброшен назад. Так, материал из ячейки 91 попадает в ячейку IV (при коэффициенте отражения $k=1$), из 92 — в III и т. д. Некоторая часть материала будет отражена дважды: так, например, материал из ячейки 95 в результате попадает в ячейку I; из 96 — в II и т. д.

Такую процедуру отражения легко реализовать программно при любом выбранном коэффициенте отражения. Результат отражения при фиксированном номере входной ячейки по отношению ко всем четырем стенкам дает одну строчку P_k с номером m .

Таким образом можно осуществить полуэмпирический расчет матриц перехода для гравитационных смесителей. Алгоритм реализован в виде программы на языке БЭЙСИК.

Возможность проведения полностью аналитического расчета возникнет, если удастся теоретически оценить законы распределения горизонтальной компоненты скорости частиц в потоке материала с учетом взаимодействия между частицами и смесительными элементами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голубчикова Г. Е., Дрейер И. О., Рязанов О. В. Использование цепей Маркова для моделирования смешения твердых материалов // Очистка сточных вод и газовых выбросов физико-химическими методами: Сб. науч. тр. — Рига, 1984. — С. 109—113.

2. Казаков В. А. Введение в теорию марковских процессов и некоторые радиотехнические задачи. — М.: Сов. радио, 1973. — 231 с.

3. Результаты моделирования гравитационного смесителя / И. О. Дрейер, Г. Е. Галкина, О. О. Рязанова, Г. Е. Голубчикова // Массообмен в химической технологии: Сб. науч. тр. — Рига: Риж. политехн. ин-т, 1986. — С. 5—11.