

Р.А. Шубин, С.Ю. Селиванов, П.А. Дорогобед

**КИНЕТИКА ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
ПРИ СДВИГОВОМ ТЕЧЕНИИ ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЫ
В РЕЖИМЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ¹**

Перемешивание как технологическая операция используется для интенсификации теплообменных процессов и организации процесса смешения. Технологической целью процесса смешения является получение смеси с равномерным распределением каждого компонента в любом участке объема.

Для аналитического описания процесса смешивания дисперсных материалов широко используется диффузионная модель. Уравнение кинетики смешения обычно формулируется при этом в виде закона диффузии Фика [1, 2]

$$j_m = -D_{\text{диф}} \text{grad } c. \quad (1)$$

Основные трудности на пути такого описания возникают при определении величины коэффициента квазидиффузионного перемешивания. Для прогнозирования коэффициента квазидиффузионного перемешивания в быстром сдвиговом потоке в работе [2] использована аналогия между зернистой средой при быстром сдвиге и плотным газом с применением понятий длины свободного пробега частиц и скорости их флуктуаций. Коэффициент квазидиффузионного перемешивания вычисляется как

$$D_{\text{диф}} = \frac{1}{2} s V', \quad (2)$$

где s – среднее расстояние между частицами; V' – скорость флуктуации.

В настоящей работе эти модельные представления используются для определения коэффициента квазидиффузии частиц в стесненных условиях взаимодействия, имеющих место при сдвиговом течении зернистой среды с умеренными и малыми скоростями сдвига.

При малых значениях скорости сдвига, даже при относительно невысоких значениях нормального напряжения, порозность зернистой среды, состоящей из частиц, близких по форме к сферическим, не превышает величины 0,5 [3]. При таких концентрациях частиц в сдвиговом потоке между ними устанавливается некоторый ближний порядок, и зоны сдвига располагаются преимущественно между элементарными слоями.

При сдвиговой деформации дисперсной среды в таких условиях взаимодействия частиц возникает их поперечный массоперенос [4], обусловленный наличием поперечной составляющей относительной скорости движения частиц.

Эта составляющая возникает в результате «наката» частицы элементарного слоя, движущегося с относительно высокой скоростью, на частицы соседнего элементарного слоя, движущегося с меньшей скоростью. В случае однородной зернистой среды наиболее вероятен одновременный контакт быстрой частицы с двумя частицами медленно движущегося элементарного слоя (рис. 1).

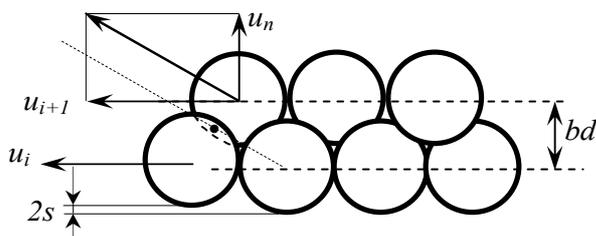


Рис. 1. Схема взаимодействия однородных частиц смежных слоев при сдвиге зернистой среды в стесненных условиях

В результате такого контакта возникает поперечная составляющая скорости движения контрольной частицы, которая становится импульсом к хаотическому перераспределению частиц в потоке зернистой среды, аналогичному формально диффузионному перемешиванию сред на молекулярном уровне.

Если предположить, что в зоне контакта двух элементарных слоев сдвигового течения в направлении x среднее значение скорости сдвига равно $\frac{dy}{dy}$, то средняя относительная скорость частиц этих смежных слоев u_0 будет

¹ Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. В.Н. Долгунина, канд. техн. наук, доц. В.Я. Борщева.

$$u_0 = u_{i+1} - u_i = bd \frac{du}{dy}. \quad (3)$$

С учетом геометрии системы поперечная составляющая скорости в относительном движении частиц в этих слоях

$$u_n = u_0 \sin\left(\pi \frac{d+s}{4d}\right). \quad (4)$$

В соответствии с моделью квазидиффузионного перемешивания [2] коэффициент квазидиффузии можно вычислить по аналогии с (2) как

$$D_{\text{диф}} = \frac{1}{2} sbd \sin\left(\pi \frac{d+s}{4d}\right) \frac{du}{dy}. \quad (5)$$

Тогда величина потока квазидиффузионного перемешивания частиц в направлении, поперечном направлению сдвига, будет определяться выражением

$$j_n = -\frac{1}{2} sbd \sin\left(\pi \frac{d+s}{4d}\right) \frac{du}{dy} \frac{dc}{dy} \rho_n. \quad (6)$$

Таким образом, коэффициент квазидиффузионного перемешивания определяется как функция скорости сдвига, размера частиц и порозности в потоке частиц.

В дальнейшем, полагая, что перемешивание среды в направлении сдвига определяется, в основном, конвекционной составляющей перемещения частиц, уравнение динамики распределения частиц в двумерном установившемся сдвиговом потоке в отсутствие эффекта сегрегации сформулировано в следующем виде

$$\frac{\partial(c\rho_n)}{\partial\tau} = -\frac{\partial(uc\rho_n)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho_n D_{\text{диф}} \frac{\partial c}{\partial y} \right). \quad (7)$$

Уравнение (7) интегрируется численным методом при граничных условиях, определяющих отсутствие потоков через границы канала, параллельные направлению сдвига,

$$D_{\text{диф}} \frac{\partial c}{\partial y} \Big|_{y=0,h} = 0,$$

а также отсутствие обратного потока в том же направлении

$$c(0, y, \tau) = c_n,$$

и начальном условии, определяющем распределение контрольных частиц в потоке, соответствующем случаю импульсного ввода индикатора:

$$\begin{aligned} c(0 < x \leq x_k, y, 0) &= 1; \\ c(x > x_k, y, 0) &= 0, \end{aligned}$$

где c_n – начальная концентрация индикатора; x_k – длина рабочего участка канала, используемого для импульсного ввода контрольных частиц.

Проверка адекватности разработанной модели динамики распределения частиц в двумерном установившемся сдвиговом потоке была проведена путем сравнения результатов моделирования процесса перемешивания с экспериментальными данными, полученными в режиме пластических деформаций на конвейерной сдвиговой ячейке по методике, описанной в [5]. В качестве модельных зернистых материалов использованы керамические гранулы диаметром $6,6 \cdot 10^{-3}$ м и частицы стеклянного бисера диаметром $3,5 \cdot 10^{-3}$ м, а в качестве индикатора – окрашенные частицы этих материалов. Экспериментальные исследования проведены при импульсном вводе индикатора и неизменных условиях сдвига для каждой из зернистых сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bridgwater, J. Interparticle Percolation: Equipment Development and mean Percolation Velocities / J. Bridgwater, M.H. Cooke, A.M. Scoott // Trans. I Chem. E. – 1978. – P. 157 – 167.
2. Dolgunin, V.N. Segregation modeling of particle rapid gravity flow / V.N. Dolgunin, A.A. Ukolov // Powder Technology 83. – 1995. – P. 95.
3. Savage, S.B. Granular Flows down rough Inclines – Review and Extension / S.B. Savage // Mechanics of granular Materials. Elsevier Science Publishers. Amsterdam. – 1983. – P. 261 – 282.

4. Долгунин, В.Н. Модель механизма сегрегации при быстром гравитационном течении частиц / В.Н. Долгунин, А.А. Уколов, П.В. Классен // ТОХТ. – 1992. – Т. 26. – С. 707 – 716.
1. Dolgunin, V.N. The conveyor shear cell for determination of particle tendency to segregation and mixing / V.N. Dolgunin, V.Ya. Borschev, G.A. Deev, A.M. Klimov // Chemical engineering a Tool for Progress : 4-th European Congress of Chemical Engineering, full text of papers in CD-Rom. – Spain : Granada, 2003.

Кафедра «Машины и аппараты химических производств»