

Т.М. КАДИЛЬНИКОВА, д-р техн. наук,

В.А. КРИВОРУЧКО

(Україна, Днепропетровск, Национальная металлургическая академия Украины)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА СЕГРЕГАЦИИ ПОТОКА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

Сегрегация представляет собой спонтанно протекающий процесс, при котором происходит перераспределением не однородных частиц материала по высоте и эффекты сегрегации обнаруживаются практически в любой сыпучей среде. Результатом сегрегации является перераспределение состава горной массы по крупности, а также образование слоев и повышение неоднородности внутри слоя. Процесс спонтанного разделения горной массы по крупности зависит от ее физико-механических свойств, гранулометрического состава, формы ее отдельных частиц и т.д. При этом сегрегация мелкой и крупной фракции является наиболее ярко выраженной и четких границ между слоями не наблюдается. Идеально однородных сыпучих материалов не существует. Примером проявления эффекта сегрегации может быть расслаивание сыпучего материала по крупности и плотности частиц, при котором более крупные и менее плотные частицы оказываются над более мелкими и плотными. Такое расслаивание обычно наблюдается при гравитационной сегрегации.

В общий случай моделирования сегрегации в сдвиговом потоке, рассмотрен в работах отечественных и зарубежных ученых и базируется на теории быстрых сдвиговых течений зернистых сред и динамики плотного газа с использованием общекинетических закономерностей процессов химической технологии. Уравнение динамики сегрегации формулируется, исходя из условия, что распределение частиц целевого компонента $c(t,x,y,z)$ в движущейся неоднородной зернистой среде является результатом сопряжения составляющих потоков конвекционного переноса, перемешивания и сегрегации и записывается в форме общего уравнения переноса:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div}(u \cdot c) = -\text{div}(\bar{j}_m) - \text{div}(\bar{j}_s), \quad (1)$$

где \bar{j}_m и \bar{j}_s – потоки перемешивания и сегрегации, являющиеся функциями координат и времени; u – вектор скорости материальной частицы зернистой среды; t – время.

Величина составляющих потока сегрегации пропорциональна степени неоднородности зернистой среды.

Экспериментальные и аналитические исследования сегрегации в сдвиговых потоках [1] позволили выявить три основных аспекта неоднородности:

1) неоднородность физико-механических свойств, размеров и формы час-

Загальні питання технології збагачення

тиц зернистой среды;

2) неоднородность среды, обусловленная примесью одного компонента к другому;

3) неоднородность свойств среды по ее объему вследствие неоднородного пространственного распределения компонентов и концентрации твердой фазы.

В связи с этим поток сегрегации \bar{j}_s можно представить как совокупность потоков, обусловленных локальной \bar{j}_l и пространственной \bar{j}_{sm} неоднородностью среды:

$$\bar{j}_s = \bar{j}_l + \bar{j}_{sm}. \quad (2)$$

При формулировании закона сегрегации вследствие локальной неоднородности среды с учетом результатов всесторонней проверки его на адекватность установлено, что степень неоднородности свойств частиц с учетом условий их взаимодействия (скорости сдвига, концентрации смеси) определяет интенсивность встречных потоков неоднородных частиц, т. е. движущую силу Δ процесса.

Поток сегрегации, обусловленный локальной неоднородностью среды, представлен в виде:

$$\bar{j}_l = K \cdot \rho_H \cdot \Delta M \cdot c, \quad (3)$$

где ΔM – параметр неоднородности, представляющий избыточную сумму моментов сил, действующих на контрольную частицу относительно некоторой мгновенной оси ее вращения; K – коэффициент скорости; ρ_H – плотность частиц.

При формулировке закона сегрегации вследствие пространственной неоднородности среды в качестве движущей силы процесса используется показатель пространственной неоднородности в виде темпа пространственного изменения среднего расстояния между частицами [2]. Соответственно поток сегрегации, обусловленный пространственной неоднородностью среды (миграции), записывается в виде

$$\bar{j}_{sm} = \rho_H \cdot c \cdot D_m \cdot \frac{1}{s} \text{grads}, \quad (4)$$

где D_m – коэффициент миграции частиц, зависящий от степени неоднородности их физико-механических свойств; s – среднее расстояние между частицами.

В итоге общее уравнение динамики сегрегации (1) можно представить в виде

$$\frac{\partial(c\rho_H)}{\partial t} + \text{div}(uc\rho_H) = -\text{div}\rho_H - D_{dif} \text{grad}c + D_m c \frac{1}{s} \text{grads} + Kc\Delta M. \quad (5)$$

Уравнение (5) используется для исследования динамики сегрегации при быстром гравитационном течении несвязных, не эластичных и негладких сферических частиц как наиболее распространенной формы течения зернистых материалов, сопровождающейся интенсивной сегрегацией.

В подобного рода потоках частицы помимо поступательной скорости движения в направлении сдвига приобретают распределенную в пространстве компоненту скорости хаотических перемещений (скорости флуктуации) V' , модуль которой имеет тот же порядок, что и модуль относительной скорости поступательного перемещения частиц.

Уравнение динамики сегрегации для двухмерного установившегося гравитационного течения, которое существует при углах ската, близких углу естественного откоса, получают из уравнения (5), пренебрегая квазидиффузией частиц в направлении ската и выражая конвекционный их поток в том же направлении через осредненную скорость $u(y)$ поступательного движения среды.

$$\frac{\partial(c\rho_H)}{\partial t} = -\frac{\partial(u \cdot c \cdot \rho_H)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho_H \left(D_{dif} \frac{\partial c}{\partial y} + D_m \frac{\partial \ln s}{\partial y} \cdot c + K \cdot c \cdot \Delta M \right) \right], \quad (6)$$

где D_{dif} – коэффициент квазидиффузионного перемешивания частиц.

Граничные условия для уравнения (6) сформулированы из условия отсутствия поперечных материальных потоков на верхней и нижней границах движущегося слоя частиц. Начальное условие задано как $c(0, x, y) = c_0$. Для описания процессов сегрегации и перемешивания твердых частиц при такого рода течениях весьма плодотворным является использование формальной аналогии между зернистой средой при быстром сдвиге и плотным газом. На базе основных закономерностей молекулярно-кинетической теории газов и с учетом физико-механических свойств дисперсной среды (коэффициентов трения и восстановления при столкновении частиц, различия их плотностей и размеров, а также вязкости и плотности межчастичной среды) получены выражения для аналитического расчета кинетических коэффициентов D_{dif} и D_m , а также движущей силы процесса гидромеханического разделения ΔM , которые входят в уравнение динамики сегрегации (6).

Значение параметра неоднородности ΔM – движущей силы гидромеханического разделения вычисляется путем микроструктурного анализа соответствующего механизма взаимодействия частиц [3]. Наиболее вероятное направление перемещения контрольной частицы будет определяться балансом моментов сил, действующих на нее относительно мгновенной оси вращения. При этом учтены силы, возникающие в системе контактирующих тел от ударных импульсов, тяжести и трения. Показатель неоднородности ΔM определяет условно интенсивность и направление сегрегации в зависимости от важнейших характеристик среды и потока, таких как размеры и плотность частиц, коэффициенты трения и восстановления при ударе, скорость сдвига.

Для несвязных частиц, близких по форме к сферическим, коэффициент сегрегации K определяется как кинетическая константа, равная скорости пере-

Загальні питання технології збагачення

мещения компоненты смеси, приходящейся на единицу избыточного момента ΔM , являющегося мерой неоднородности сферических частиц в условиях их взаимодействия в потоке среды.

Коэффициент миграции частиц определяется уравнением:

$$D_m = \frac{\bar{m}(c) \cdot (V')^2}{4F} \left(\frac{d_1^2}{m_1 \bar{d}^2} - \frac{d_2^2}{m_2 \bar{d}^2} \right), \quad (7)$$

где m_1, d_1 и m_2, d_2 – массы и диаметры частиц компонентов; $\bar{m}(c)$ – средняя масса частиц смеси; \bar{d} – средний диаметр частиц.

Коэффициент квазидиффузионного перемешивания частиц определяется в виде:

$$D_{dif} = \frac{1}{2} s \cdot V', \quad (8)$$

где V' – скорость хаотических перемещений (флуктуации).

Для моделирования динамики распределения частиц в сдвиговом потоке в соответствии с уравнением (5) используется единственный экспериментально определяемый коэффициент сегрегации K , обусловленный неоднородностью среды. Коэффициенты квазидиффузионного перемешивания и миграции D_{dif} и D_m вычисляются аналитически для частиц, близких к сферическим.

Примем условно, что поток материала состоит из частиц, физико-механические свойства которых определяются как свойства среды в целом, т.е. свойства исследуемого потока мелкофракционного материала будут определяться с учетом концентраций его компонентов, а величина параметра неоднородности ΔM будет вычисляться как функция концентрации контрольных частиц. Параметры быстрого сдвигового потока можно принять, как условно однородную среду, исходя из представления о сыпучем материале.

Для проведения экспериментов была сконструирована лабораторная установка рис. 1.

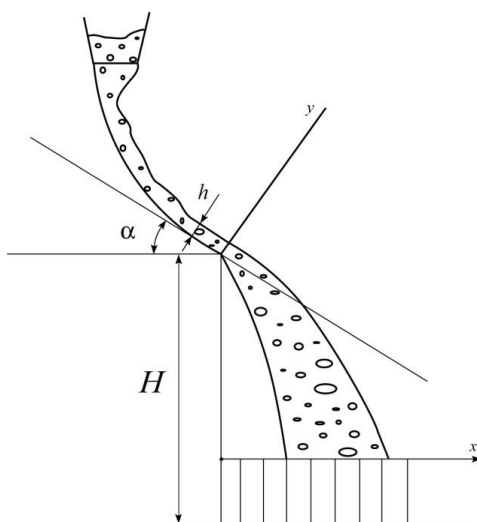


Рис. 1. Общий вид лабораторной установки

Загальні питання технології збагачення

В результате исследования определены следующие характеристики физико-механических свойств сыпучего материала:

- плотность частиц – 2086 кг;
- порозность неподвижного слоя – 0,42;
- угол естественного откоса – 27° ;
- время процесса – 4,5 с;
- ширина слоя – 0,06 м;
- толщина слоя – 0,04 м;
- ширина ячейки – 0,03 м;
- высота порога ската – 0,7 м;
- угол ската – 37° .

На рис. 2-4 приведены полученные в результате этих исследований профили распределения контрольных частиц в гравитационных потоках стеклянных шариков. Во всех приведенных случаях наблюдается явная корреляция между гидродинамическими параметрами потока и эффектами сегрегации.

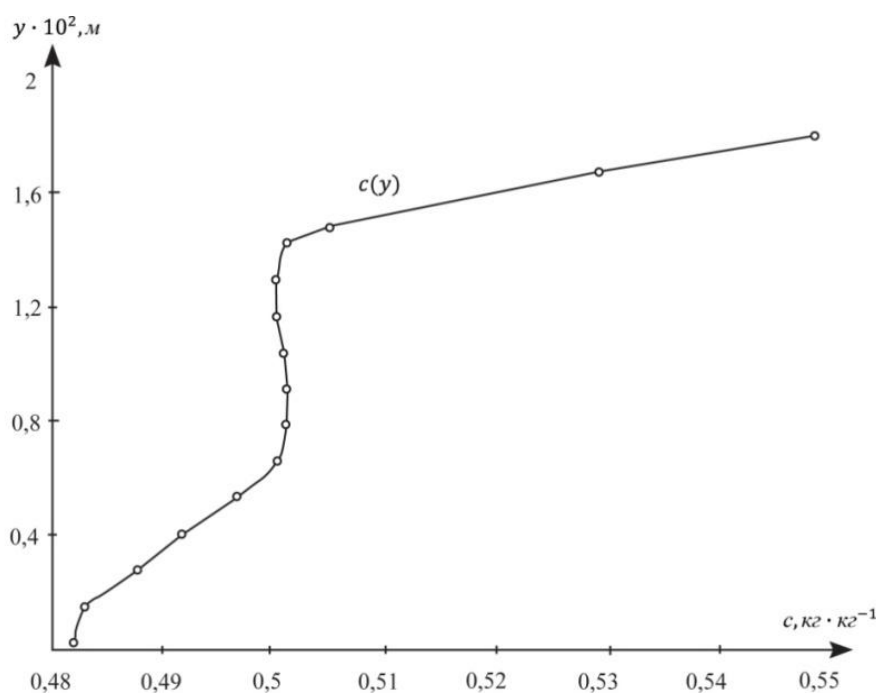


Рис. 2. Концентрации $c(y)$ в гравитационном потоке стеклянных шариков, состоящего из фракций $3 \cdot 10^{-3}$ м – 50%, $3,5 \cdot 10^{-3}$ м – 50%

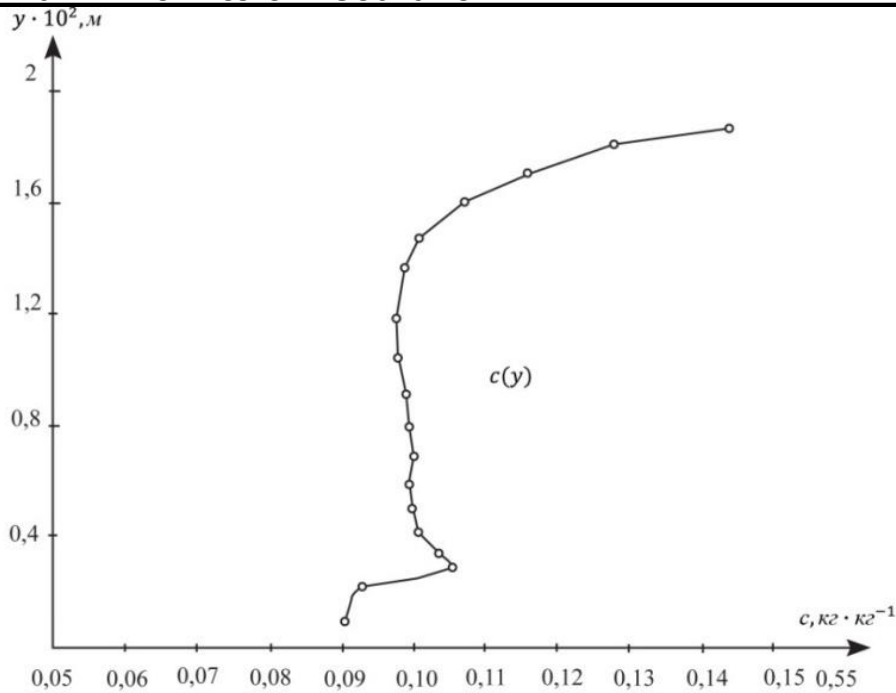


Рис. 3. Концентрации $c(y)$ в гравитационном потоке стеклянных шариков, состоящего из фракций $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} - 90\%$, $3,75 \cdot 10^{-3} \text{ м} - 10\%$

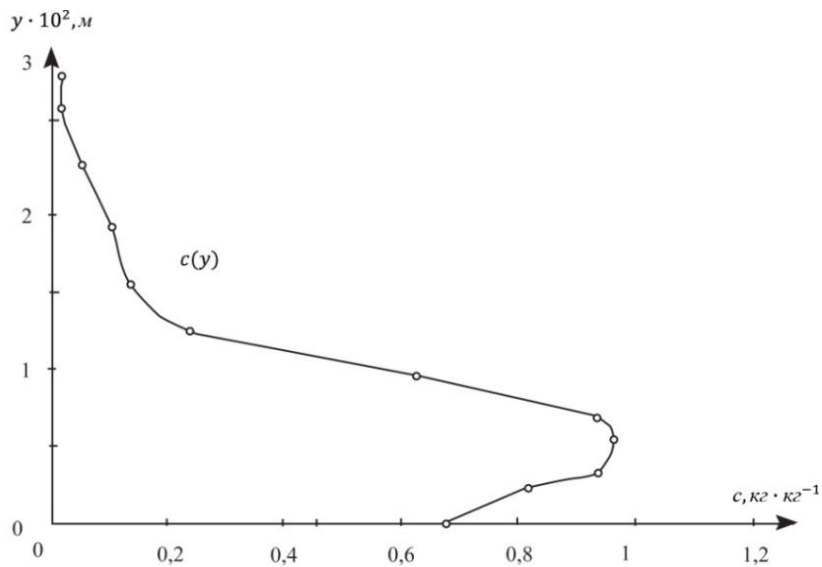


Рис. 4. Концентрации $c(y)$ в гравитационном потоке стеклянных шариков, состоящего из фракций $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} - 30\%$; $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} - 70\%$

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что с увеличением различий в размерах частиц интенсивность сегрегации увеличивается, а также на процесс сегрегации частиц по размеру влияет скорость сдвига. Очевидно, что располагая возможностью прогнозирования эффектов перераспределения частиц в гравитационном потоке сыпучего материала, можно определить такие условия как, например, изменение состава сыпучей среды по длине, высоте слоя и скорости сдвига, при которых достигаются требуемые показатели либо однородности, либо неоднородности смеси.

Список литературы

1. Иванов О.О. Кинетика и метод определения кинетических характеристик сегрегации при гравитационном течении зернистых материалов: Дисс. ... канд. техн. наук. – Тамбов: ТГТУ, 200. – 168 с.
2. Development of the model of segregation of particles undergoing granular flow down on inclined chute / V.N. Dolgunin, A.N. Kudy, A.A. Ukolov // Powder Technology. – 1998. – P. 211-218.
3. Долгунин В.Н., Уколов А.А., Классен П.В. Модель механизма сегрегации при быстром гравитационном течении частиц // Теор. основы хим. технол. – 1992. – Т. 26, № 5. – С. 100-109.

© Кадильникова Т.М., Криворучко В.А., 2012

*Надійшла до редколегії 14.09.2012 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*