

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЯВЛЕНИЯ ВНУТРИСЛОЕВОЙ СЕГРЕГАЦИИ

Рассмотрены основные теоретические подходы процесса сегрегации. Выделены три основных направления. Подчеркнута необходимость дальнейшего изучения процесса сегрегации, что позволит создать новый высокоеффективный и производительный сепаратор.

The basic idealized approaches of process of a segregation are reviewed. Three reference directions are discharged. The necessity further analysis of process of a segregation is pointed out, that will allow to create the new high-performance and productive separator.

Феномен процесса сегрегации зернистого материала (расслоение, стратификация, фракционирование) при механическом воздействии до сих пор не имеет удовлетворительного теоретического объяснения [6].

Теоретическому исследованию сегрегации посвящено значительное число работ. Все работы можно разделить на два направления, подхода: вероятностный [6] и феноменологический [2]. Но в основу прямых расчетов сегрегации должны быть положены конкретные механизмы.

Первый метод, и вероятно наиболее важный для практики, действует при сдвиге зернистого материала, если градиент скорости неоднороден [4]. При сдвиге частицы самоорганизуются в слое, а крупная частица, которая не помещается в одном слое, сталкивается своими выступающими краями с частицами соседних слоев и из-за неоднородности градиента скорости материала получает нескомпенсированный импульс в направлении нормали к плоскости сдвига. Роль деформации сдвига по сравнению с другими механическими воздействиями сегрегации в значительной степени зависит не только от размеров, но также и от плотности частиц.

Второй метод связан с хаотическим движением частиц, аналогичен термодиффузии в газах, при которой более крупные молекулы мигрируют в зону низкой темпе-

ратуры, и реализуется даже при нормальной вибрации границы сыпучей среды. Роль температуры в сыпучей среде играет среднеквадратическая скорость хаотического движения частиц, которая затухает по мере удаления от вибрирующей границы. При этом крупная частица как бы экранирует поток квазитеpla от вибрирующей границы, с чем и связана действующая на нее выталкивающая сила.

Третий метод основан на закатывании крупной частицы по мелкой наверх. Этот механизм был установлен численным моделированием [3] движения тридцати шероховатых дисков (плоская задача) в трапециевидном расширяющемся кверху вибрирующим бункере. Обнаружена сильная зависимость от коэффициента трения. Устойчивое закатывание зарегистрировано при коэффициенте трения 2, при малом коэффициенте закатывание отсутствует.

Рассмотрим каждый из механизмов и подходов подробно, выявляя основные факторы и недостатки.

Суть первого механизма заключается в подвижности зерен: чем больше общая подвижность зерен в слое при расслаивании, тем лучше разделение по плотности и хуже разделение по крупности.

Второй подход основывается на изучении процесса расслоения на вибрирующей поверхности, т.е. грохочении [1, 2].

Исследователь А.Д.Учитель предлагает анализируемый слой разделить на подслои, каждый из которых будет характеризоваться своей концентрацией частиц  $C$  и своей скоростью сегрегации  $V$  [7]. В этом случае скорость сегрегации слоя после незначительных преобразований имеет вид

$$V_{C_j} = K_i \left( 1 - \frac{d_i}{K_\omega} \right) \sqrt{(K_\omega d_n - d_i)}, \quad (1)$$

где  $K_i$  – коэффициент, зависящий от физических свойств материала и учитывающий угол внутреннего трения  $\Psi$  и коэффициента формы частиц  $K_\phi$ ,

$$K_i = \frac{1}{2} K_\phi \sqrt{\frac{g}{\tan \varphi}}; \quad K_\omega = 1 - e^{-(0.75 \dots 1.0) \frac{A\omega^2 \cos \beta}{g}};$$

$d_i$  – средний размер сегрегирующей фракции;  $d_n$  – средний диаметр порового канала,

$$d_n = \frac{2}{3} K_\phi d_k \frac{m_{\text{н.и}}}{1 - m_{\text{н.и}}},$$

$d_k$  – средний размер частиц, образующих поровой канал;  $m_{\text{с.м}}$  – порозность сыпучей среды с учетом ее разрыхления при вибрации.

Данные, которые свидетельствовали о применении на практике формулы (1) для скорости сегрегации, отсутствуют. При анализе формулы (1) возникает ряд вопросов:

1. С помощью какого устройства можно измерить порозность сыпучей среды?

2. Коэффициент крупных частиц можно получить практически, но как определить его для мелких частиц?

3. Не ясен пока и введенный параметр – средний размер сегрегирующей фракции. Если у нас двухкомпонентная смесь, например магнетит и кварц, то сегрегирующими частицами будет магнетит. Но на практике мы имеем дело с поликомпонентной рудой, где представлены различные минералы, и часто в сростках. Понять, какой минерал (и скорее всего не один) будет сегрегирующим, остается под вопросом. При грохочении у нас довольно широкая гранулометрическая характеристика: имеют место как крупные частицы, так и мелкие; усредняя

этот размер, получим большую погрешность в полученных данных.

На этот механизм опирается исследователь Е.А.Непомнящий [6]. В основу положен математический аппарат, примененный ранее по «вибросмешиванию» сыпучих материалов, где поведение частиц не различается по удельному весу и движение зерен в слое рассматривается как случайный Марковский процесс. Взяв за основу уравнение диффузии и значительно преобразовав, получим уравнение концентрации в подслое:

$$\begin{aligned} \omega = 4\bar{h} \frac{e^{-4\bar{h}\bar{z}}}{1 - e^{-4\bar{h}}} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{8\bar{h}m^2\pi^2[1 - (-1)^m e^{2\bar{h}}]}{4\bar{h}^2 + m^2\pi^2} \times \\ \times e^{-2\bar{h}\bar{z}} \left( \frac{2\bar{h}}{m\pi} \sin m\pi\bar{z} - \cos m\pi\bar{z} \right) e^{-\left( \frac{m^2\pi^2}{4\bar{h}^2} + 1 \right)\bar{t}}; \quad (2) \end{aligned}$$

$$\bar{t} = \frac{c^2}{2b} t, \quad \bar{h} = \frac{c}{2b} h, \quad \bar{z} = \frac{z}{h},$$

где  $b$  – квазидиффузия;  $c$  – скорость вынужденного переноса частиц;  $h$  – толщина слоя.

С помощью уравнения (2) может быть рассчитана концентрация ( $\bar{h} > 0$ ,  $\bar{h} < 0$ ) частиц в заданном сечении  $\bar{z}$  слоя в любой момент времени. Уравнение, которое может быть названо уравнением кинетики расслоения или смешивания, позволяет определить изменение начального распределения частиц в слое с течением времени. Согласно формуле (2) концентрация  $\omega$  в сечении  $\bar{z}$  слоя зависит от двух безразмерных величин:  $\bar{t}$  и  $\bar{h}$ , которые, в свою очередь, зависят от двух коэффициентов:  $b$  и  $c$  [6]. Кроме того, Е.А.Непомнящий приводит графический вид изменения концентрации легких зерен при расслаивании, но отсутствуют практические данные. Основной недостаток формулы (2) – сложность в определении «коэффициента квазидиффузии»  $b$  и скорости осаждения (всплытия)  $c$ . Кроме того, невозможно измерить экспериментально предельную концентрацию частиц, так как взяв за основу некоторые сечения, не исключено искажение картины влияния свободной поверхности.

Б.В.Кизевальтер также в [4] проводит теоретический анализ явления сегрегации.

В результате детерминистического анализа авторы приходят к выводу, что погружение или всплытие тел в сыпучей среде, подвергающейся вибрациям, может обуславливаться тремя взаимодействующими факторами:

1) отличием плотности частицы от плотности среды;

2) несимметрией сил сопротивления среды, при которой сила сопротивления при движении частиц вверх меньше, чем при движении вниз;

3) несимметрией закона колебаний среды.

Аналогичный механизм сегрегации, под воздействием вибраций, взят за основу и А.Д.Училелем [7].

Рассмотрим подробно третий механизм, основанный на закатывании крупных частиц по мелким наверх.

Данный принцип подробно описал В.М.Бочковский [1]. Механизм разделения по удельной плоскости можно объяснить только эффектом расклинивания или расталкивания нижележащих зерен вышележащими. Зерна разной плотности, но одинакового диаметра в одних и тех же условиях обладают различной расклинивающей способностью; большей способностью обладают зерна тяжелого минерала. Однако расклинивающая способность зерен может проявиться только в том случае, если общее сопротивление движению расклиниваемых зерен относительно не велико и может преодолеваться под действием таких незначительных сил, как расклинивающие. При толчках в гибкое дно и при движении по наклонной поверхности расклинивающий эффект проявиться не может в силу недостаточной подвижности расклиниваемых зерен.

Согласно В.М.Бочковскому расслаивание как процесс, разделенный по двум составляющим, зависит от характера колебаний. Однако, нет ни одного подтверждения данной теории. Возникает множество вопросов: какова зависимость между этим механизмом и закономерностями расслаивания; какие конкретные особенности этого механизма обуславливают расположение

зерен в каждой из разновидностей расслоения; почему зерна тяжелого минерала просеиваются скорее, а поднимаются медленнее, чем легкого и т.д.

А.А.Краснов, В.В.Карамазин, А.С.Опалев [5] и другие исследователи тоже сделали попытку теоретического анализа явления сегрегации. Основной характеристикой процесса выдвигают эквивалентный диаметр пор и каналов:

$$d_c = \frac{2}{3} d \left( \frac{1}{C_v} - 1 \right),$$

где  $d$  – средний диаметр твердых частиц, образующих структуру;  $C_v$  – объемная концентрация твердой фазы.

Зная функцию распределения частиц по крупности и концентрации, получим окончательное выражение эквивалентного диаметра пор и каналов, образованных частицами в рыхлом осадке и меняющимся по высоте сформированного слоя:

$$d_c = \frac{2}{3} \int_0^{X_m} \varphi(x) x dx \left( \frac{1}{C_v^{cr}} - 1 \right),$$

где  $C_v^{cr} = k_y / (1 + \lambda s)$  – объемная концентрация критической величины, определяемой из условия сцепления пограничных слоев;  $s$  – удельная поверхность межфазного контакта «твердая фаза – жидкость»;  $\lambda$  – толщина пограничного слоя жидкости на поверхности частиц твердой фазы;  $k_y$  – коэффициент упаковки твердой фазы в суспензии.

К сожалению пока не понятно, как изменится эквивалентный диаметр пор и каналов от изменения жидкой фазы, формы частиц и т.д.

## Выводы

1. В данный момент существуют как минимум два основных направления и три механизма описания с теоретической точки зрения процесса сегрегации. Опытов, подтверждающих один из этих механизмов нет, если не считать качественных опытов проявления процесса расслоения.

2. Отсутствует аппарат или устройство, с помощью которого можно было бы исследовать явления сегрегации, и как следствие – нет количественных опытов.

3. Изучение данного феномена позволит не только улучшить технологические показатели за счет понимания процесса концентрации, но и создать новый высокоеффективный и производительный сепаратор.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Блехман И.И. К теории разделения сыпучих смесей под воздействием колебаний / И.И.Блехман, В.Я.Хайнман // Инженерный журнал «Механика твердого тела». 1968. № 6. С.5-13.

2. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Наука, 1994. 247 с.

3. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. М.: Недра, 1979. 296 с.

4. Кизевальтер Б.В. Об определении скоростей свободного и стесненного падения частиц / Труды института «Механобр». Л., 1971. Вып.136. С.5-35.

5. Краснов А.А. Сегрегация зернистого материала при сдвиговой деформации слоя // Исследование процессов, машин и аппаратов разделения материалов по крупности / Труды института «Механобр». Л., 1988. С.50-64.

6. Непомнящий В.А. К теории самосортирования сыпучих смесей // Изв. ЛЭТИ. 1961. Вып.46. С.217-227.

7. Учитель А.Д. К анализу процесса сегрегации сыпучих материалов на вибрационных грохотах // Исследование процессов, машин и аппаратов разделения материалов по крупности / Труды института «Механобр». Л., 1988. С.71-80.