

УДК 621.762:66.084

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ, ФОРМЕ И МАССЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВИБРАЦИИ

Л.П. ПИЛИНЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6 Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 5 июня 2015*

Приведены результаты исследований процесса разделения твердых частиц по размерам, форме и массе под воздействием вибраций. В результате проведенных исследований установлены три области возможных состояний дисперсной смеси твердых частиц в зависимости от параметров вибрации, воздействующей на данную смесь: область, в которой происходит уплотнение частиц смеси; область разделения частиц по размерам и массе и область интенсивного перемешивания (виброкипение) смеси порошков.

*Ключевые слова:* вибрация, частица, разделение, размер, масса, форма.

### Введение

Вибрацию используют в различных областях деятельности человека при выполнении разнообразных технологических процессов, например, разделении дисперсных материалов по физико-механическим свойствам и их смешивание; уплотнение обрабатываемой дисперсной среды и ее разрыхление; заполнение емкостей сыпучими материалами и их разгрузка и др [1–3].

Важной особенностью полезного использования вибрации в различных областях народного хозяйства является разделение твердых частиц по их физическим характеристикам [4]. С помощью вибрационного разделения дисперсных частиц решают многие технологические задачи: очистка сырья от примесей; фракционирование, сортирование и др. [5]. Причинами разделения частиц могут быть их различия в размерах, форме, плотности, упругости, и др. В большинстве случаев влияние этих свойств на процессы разделения под воздействием вибрации проявляются в определенных сочетаниях друг с другом. На практике, как правило, одно из них выделяют в качестве основного, остальные же являются вспомогательными. Основы теории предельного равновесия дисперсной среды, предложенные еще в середине XVIII века Кулоном, положили начало систематическим исследованиям в области теории и практики дисперсных материалов. Однако необходимо отметить, что до сих пор нет законченной и обобщенной теории динамики дисперсных сред, что осложняет разработку и применение динамических процессов, происходящих в дисперсных средах под воздействием вибраций. Поэтому для разработки и внедрения процессов, основанных на разделении частиц дисперсной среды под воздействием вибрации, путь экспериментального исследования закономерностей поведения частиц под воздействием вибрации является основным.

Целью данной работы является исследование процесса разделения частиц дисперсной среды по физическим свойствам под воздействием вибрации.

### Методика эксперимента

Исследования процесса разделения частиц, по размерам, форме и массе проводили с помощью вибрационного электродинамического стенда типа ВЭДС-10А и устройств, представленных на рис. 1.

Стенд состоит из вибростола, усилителя и пульта управления. Принцип работы вибратора основан на использовании электродинамической приводной системы, которая состоит из электромагнита с кольцевым воздушным зазором и подвижной системы подвешенной на двух упругих мембранах. По катушке подмагничивания пропускается постоянный ток от блока подмагничивания. Через подвижную катушку пропускается переменный ток, частота и величина которого определяется параметрами испытаний и задается пультом управления вибратора через усилитель. Ток подвижной катушки взаимодействует с постоянным полем электромагнита, и создает толкающую силу, которая приводит в действие вибростол с испытуемым образцом. Вибрационный стенд имеет следующие основные технические характеристики: рабочий диапазон частот 5–5000 Гц; максимальное виброускорение – 160 м/с<sup>2</sup>.

Исследования процесса разделения частиц, по размерам, форме и массе проводили с помощью вибрационного электродинамического стенда типа ВЭДС-10А и устройств, представленных на рис. 1.

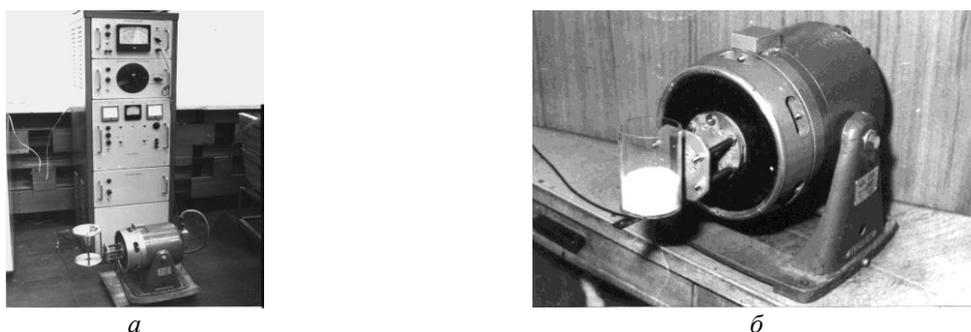


Рис. 1 Вибрационный стенд ВЭДС-10А (а), вибростол и устройство для исследования процесса сегрегации частиц по размерам (б)

Исследования разделения частиц по размерам при наложении вибрации заключались в проведении экспериментов по перемещению крупных частиц, проходящих через слой мелких, при различных параметрах вибрации. При исследовании разделения частиц по массе, легкие частицы помещались внизу контейнера, а сверху насыпался слой более тяжелых частиц. Для этого был изготовлен специальный контейнер, из прозрачного органического стекла, который крепился к вибростолу (рис. 1, б). Наблюдая за положением исследуемых частиц в контейнере, а также измеряя время их движения к поверхности, определяли параметр классификации (разделения) (время перемещения исследуемых частиц на поверхность). При этом считали, что чем больше эта величина, тем меньше склонность частиц дисперсной смеси к разделению.

Исследования явления разделения по размерам и форме проводились на частицах порошка бронзы марки БрОФ-10-1 следующих фракций: (–0,063...+0,04); (–0,1...+0,063); (–0,16...+0,1); (–0,2...+0,16); (–0,315...+0,2); (–0,4...+0,315); (–0,63...+0,4) мм с фактором формы  $FF = 1$  и  $FF = 0,5$ .

Перед постановкой экспериментов порошки фракций (–0,063...+0,04) и (–0,1...+0,063) просушивали в сушильном шкафу при температуре 100 °С в течение 1 ч., а порошки остальных фракций – подвергали температурной обработке при температуре 450 °С. При этих температурных режимах порошки более крупных фракций окислялись и приобретали темный цвет, поэтому хорошо отличались в прозрачном контейнере от порошков мелких фракций.

### Экспериментальные исследования

Для исследования явления разделения частиц по массе для исследований были выбраны кроме порошков бронзы, порошки титана, алюминия, а также порошок карбамида.

При исследовании закономерностей разделения были проведены эксперименты по определению влияния на этот процесс следующих факторов: соотношения размеров мелких и крупных частиц, соотношения массы легких и тяжелых частиц; фактора формы частиц; исходного положения крупных частиц в контейнере; параметров вибрации (частоты, ускорения, направления колебаний); толщины слоя мелких частиц.

Эксперименты показали, что разделение частиц по размерам, массе наблюдается в определенном диапазоне значений параметров частоты и ускорения вибрации, а также их

сочетаний. Так, на рис. 2 показаны три области состояния дисперсной смеси в зависимости от параметров вибрации. В области I происходит только уплотнение смеси порошков. В области II происходит разделение частиц по размерам, массе, причем границы области не зависят от соотношения размеров и массы мелких и крупных частиц. В области III происходит интенсивное перемешивание (виброкипение) смеси порошков, т.е. такое состояние, в котором частицы, перемещаясь, отрываются друг от друга. Естественно для технологических процессов, основанных на разделении дисперсных сред наибольший интерес представляет область II, в которой наблюдается разделение частиц по размерам и массе. Математической обработкой кривых, представленных на рис. 2, была получена следующая регрессионная зависимость диапазона параметров колебаний, при которых происходит разделение частиц по размерам и массе.

$$3,96 \exp 0,0103 f \leq a \leq 8,78 \exp 0,012 f, \quad (1)$$

где,  $a$  – ускорение вибрации,  $\text{м/с}^2$ ;  $f$  – частота вибрации, Гц.

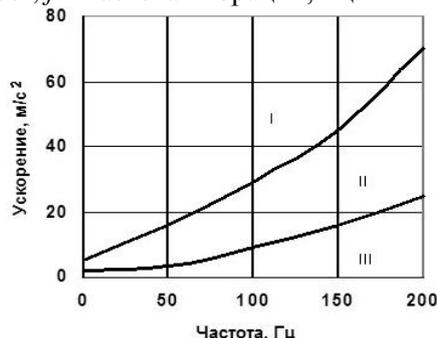


Рис. 2. Поведение частиц порошка в зависимости от параметров вибрации:  
I – уплотнение, II – разделение, III – виброкипение

На рис. 3 показана зависимость времени разделения частиц порошка бронзы по размерам от параметров вибрации. Из приведенных зависимостей следует, что с увеличением ускорения вибрации, время разделения при любой заданной частоте уменьшается.

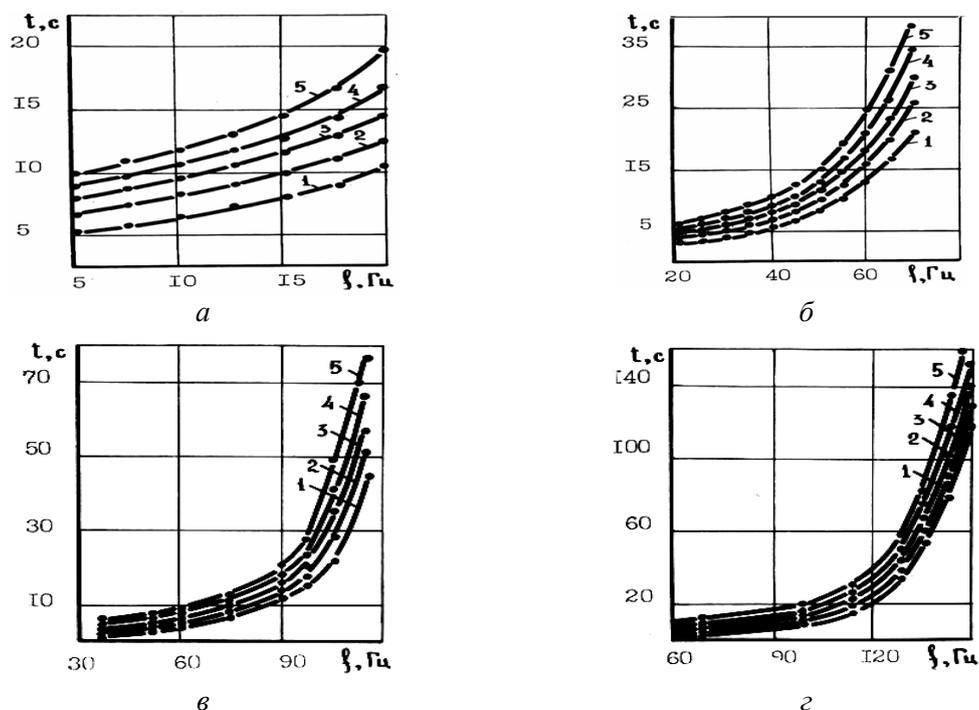


Рис. 3. Зависимость времени разделения  $t$  от частоты  $f$  при заданных значениях ускорения:  
 $a - 5 \text{ м/с}^2$ ; б –  $10 \text{ м/с}^2$ ; в –  $15 \text{ м/с}^2$ ; г –  $20 \text{ м/с}^2$

Размер мелких частиц порошка бронзы марки БрОФ-10-1 ( $-0,063...+0,04$ ) мм. Размер крупных частиц: 1 – ( $-0,63...+0,4$ ) мм; 2 – ( $-0,4...+0,315$ ) мм; 3 – ( $-0,315...+0,2$ ) мм; 4 – ( $-0,2...+0,16$ ) мм; 5 – ( $-0,16...+0,1$ ) мм.

В табл. 1 приведены значения ускорения, при которых время разделения частиц по размерам имеет наименьшее значение.

Таблица 1. Значения параметров вибрации, соответствующие минимальному времени разделения частиц порошка бронзы

Частота, Гц	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Ускорение, $m/c^2$	12	14	16	21	27	33	41	49	65	81

На рис. 4, а приведены зависимости времени разделения частиц от размеров крупных частиц и толщины слоя мелких, из которого можно видеть, что чем толще слой мелких частиц, тем больше время сегрегации. Вместе с тем, нет прямой зависимости между этими величинами для идентичных условий вибрации.

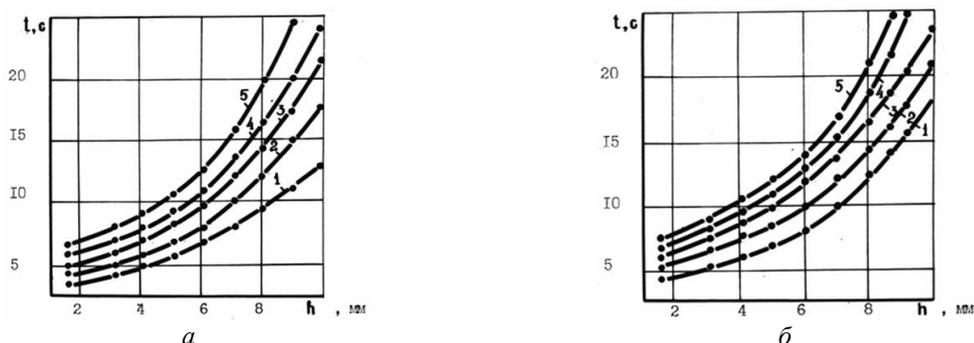


Рис. 4. Зависимость времени разделения  $t$  от толщины слоя  $h$ :

- а – разделение частиц порошка бронзы марки БрОФ-10-1 по размерам ( $a = 10 m/c^2, f = 30$  Гц, размер мелких частиц ( $-0,063...+0,04$ ) мм, размер крупных частиц: 1 – ( $-0,63...+0,4$ ) мм; 2 – ( $-0,4...+0,315$ ) мм; 3 – ( $-0,315...+0,2$ ) мм; 4 – ( $-0,2...+0,16$ ) мм; 5 – ( $-0,16...+0,1$ ) мм);  
 б – разделение частиц по плотности для порошков: 1 – ПМС; 2 – 12Х18Н10; 3 – БрОФ-10-1; 4 – ПТХ-2-1; 5 – ПА-3

Приведенные зависимости также показывают, что время разделения зависит от соотношения размеров мелких и крупных частиц. С увеличением размеров крупных частиц или уменьшением размеров мелких при одних и тех же параметрах вибрации, время разделения уменьшается.

Эксперименты по исследованию влияния исходного положения крупных частиц в контейнере на параметры разделения заключались в следующем. Крупная частица (размер  $-0,4...+0,315$ ) мм помещалась, в центре основания контейнера, а затем у стенки и определялось время, необходимое для поднятия частицы на поверхность слоя мелкого порошка (фракция  $-0,063...+0,04$ ) мм, толщина слоя 10 мм). Результаты экспериментов показали, что при одних и тех же параметрах вибрации время поднятия на поверхность крупной частицы, помещенной в центре, меньше, чем около стенки. Например, для вибрации с частотой 30 Гц и ускорением  $10 m/c^2$  крупные частицы, помещенные в центре, поднимаются на поверхность на 10 с быстрее, чем те же частицы, помещенные около стенки контейнера. Причина наблюдаемого явления заключается в том, что частицы, лежащие около стенок контейнера, стеснены в движении, и обладают меньшей свободой перемещения по сравнению с частицами, расположенными в центре. Поэтому следует считать, что форма и размер контейнера влияют в общем случае на время разделения частиц по размерам.

Результаты экспериментальных исследований влияния направления вибрации на разделение частиц показали, что горизонтальные вибрации наиболее предпочтительны. Это объясняется тем, что горизонтальные колебания более благоприятны для действия основных механизмов, влияющих на классификацию дисперсных смесей. Например, для механизма - «гравитационное просеивание», представляющего движение мелких частиц под действием сил тяжести сквозь поры, образованные крупными частицами, необходимо, чтобы ускорение колебаний было направлено под углом к вертикали, так как при наличии только строго вертикальных сил, движение частиц происходить не будет. Необходимо отметить, что на

практике чрезвычайно сложно добиться строго вертикального ускорения вибрации, так как, даже при вертикальных колебаниях в массе порошка возникают горизонтальные силы от действия различных факторов, например, от положения формы. Кроме того, следует учитывать, что при сообщении порошку колебаний, коэффициент трения между частицами уменьшается, и поэтому для некоторых мелких частиц, у которых в покое сохранялось условие равновесия, при сообщении колебаний это условие нарушается и имеет место гравитационного просеивания мелких частиц сквозь поры, образованные крупными частицами.

В табл. 2 приведены результаты экспериментальных исследований, влияния фактора формы частиц на их разделение при наложении вибрации.

Таблица 2. Зависимость времени разделения частиц порошка бронзы с различным фактором формы (размер крупных частиц (-0,4...+0,315) мм, размер мелких частиц (-0,1...+0,063) мм

№ опыта	Частота вибрации, Гц	Ускорение вибрации, м/с <sup>2</sup>	Время разделения, с	
			Фактор формы частиц, $FF$	
			1,0	0,5
1	10	5	7	9
2	20	5	13	16
3	30	10	3	5
4	40	10	7	9
5	50	15	6	8
6	60	15	9	11
7	70	20	10	13
8	80	20	8	10
9	90	25	11	14
10	100	25	8	10
11	110	30	13	15
12	120	30	6	8
13	130	35	13	15
14	140	40	5	8
15	150	45	5	8
16	160	55	5	7
17	170	60	8	11
18	180	75	6	8
19	190	75	11	14
20	200	80	6	8

Анализ приведенных в табл. 2 результатов показывает, что разделение сферических частиц с фактором формы  $FF = 1$  происходит быстрее, чем с  $FF = 0,5$  и носит одинаковый характер при одних и тех же параметрах вибрации. Это можно объяснить тем, что сферическим частицам легче подняться на следующий слой, так как здесь основную роль играет так называемый «эффект клина», а мелким опуститься, так как в данном случае имеет место «эффект просеивания».

### Заключение

На основании экспериментальных исследований можно заключить, что разделение металлических порошков происходит в строго определенном диапазоне параметров вибрации и определяется неравенством  $3,96 \exp 0,0103f \leq a \leq 8,78 \exp 0,012 f$ .

Время разделения частиц зависит от соотношения размеров и массы крупных и мелких частиц, а именно, с ростом величины соотношения время разделения уменьшается.

## RESEARCHING THE PROCESS OF SEPARATION OF SOLID PARTICLE BY SIZE, SHAPE AND MASS DUE TO VIBRATION

L.P. PILINEVICH

### Abstract

The results of the separation process of solid particle by size, shape and weight of due to vibration are shown. There are defined three possible states of the field of the dispersed solid particles in the

mixture depending on the parameters of vibration exerted on the mixture: an area in which the compaction of the mixture, the area separating particles by size and weight, and the area of intense mixing mixture powders.

### Список литературы

1. *Вайсберг Л.А.* Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М., 1986.
2. Вибрационные машины и технологии // Сб. науч. трудов: Курский политехнический институт. 1993. Вып. 2. С. 234.
3. *Ганиев Р.Ф., Кобаско М.И., Кулик В.В. и др.* Колебательные явления в многофазных средах и их использование в технологии. Киев, 1980.
4. *Коган Э.А.* // Тез. докл. Всесоюзн. конф. по вибрационной технике. Кутаиси–Тбилиси, 1981. С. 17–18.
5. Вибрация в технике. / Под ред. К.В. Фролова. М., 1995.