

УДК 621.928.6:519.28

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ СРЕДЫ И УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КРИВЫЕ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ГРАВИТАЦИОННОЙ СЕПАРАЦИИ

Кривые разделения для процессов гравитационной сепарации обладают свойством аффинности. Это значит, что при определенном преобразовании осей координат все экспериментальные значения фракционного извлечения образуют единую кривую в этих координатах. Значения ординат при получении таких универсальных кривых получили названия критериев подобия для сепарационных процессов. Определены критерии подобия для получения универсальных кривых разделения при сепарации для частиц различной крупности в потоках подвижной среды для разных режимов: ламинарного, переходного и турбулентного. Однако осталось неясным, в каких границах следует применять тот или иной критерий в конкретных условиях разделения. В статье приведен анализ физических основ взаимодействия твердой фазы и подвижного потока в разных режимах его движения. Доказано, что весь диапазон от ламинарного до развитого турбулентного перекрывается двумя критериями подобия.

Ключевые слова: сепарация, аффинность, кривые разделения, режим движения среды, крупность частиц, область действия критерия.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие твердой частицы и подвижной среды при простом осаждении происходит вблизи поверхности частицы [1]. Если установившаяся скорость осаждения частицы принимает значение, равное v , то относительная скорость обтекания ее средой равна абсолютной скорости движения частицы $w = -v$.

Непосредственно на поверхности частицы благодаря силам сцепления образуется элементарный слой, который движется вместе с частицей. Скорость от этого слоя передается силами вязкости к близко расположенным элементарным массам среды. Это приводит к монотонному убыванию скорости в пограничном слое по нормали к поверхности от v до 0. Причем этот переход происходит плавно. Такая картина складывается в передней части твердого тела или на всей поверхности при безотрывном обтекании при небольших скоростях осаждения.

Иначе складывается обстановка при движении с отрывом пограничного слоя. При высоких скоростях осаждения среда затормаживается возникающим противодавлением вдоль поверхности частицы, которая вызывает движение среды против направления обтекания.

При этом в некоторой точке происходит отрыв пограничного слоя от поверхности частицы. Обратное течение полностью дезорганизует движение. Если до отрыва от поверхности пограничный слой был ламинарным, то после отрыва он ведет себя как свободная струя в затопленном пространстве и становится турбулентным. В точке отрыва поверхностный слой становится неустойчивым и свертывается в один или несколько вихрей.

Установлено [2], что все количественные особенности процесса осаждения — толщина пограничного слоя, место положения точки отрыва, профиль скорости в пограничном слое и характер его изменения, общая величина сопротивления — зависят от критерия Рейнольдса, рассчитанного для частицы:

$$Re_p = \frac{vd\rho_0}{\mu},$$

где v — скорость частицы, м/с; d — диаметр частицы, м; ρ_0 — плотность среды, кг/м³; μ — динамический коэффициент вязкости среды, кг/(м·с).

С помощью этого критерия различаются ламинарный, турбулентный и промежуточный режимы обтекания.

Протекающий поток усложняет все явления, происходящие на поверхности частиц. Например, в ламинарном потоке обтекание частицы может быть ламинарным, а может быть и турбулентным в зависимости от размера частиц. Внешняя турбулентность может влиять на характер обтекания даже мелких частиц. Режим движения потока, как известно, также определяется числом Рейнольдса, рассчитанным для потока [3]:



Е. М. Барский
E-mail: barskym@bgu.ac.il

$$Re_D = \frac{wD\rho_0}{\mu},$$

где w — средняя по сечению канала скорость потока, м/с; D — диаметр канала, м.

Здесь возникает проблема с использованием критериев подобия для процессов сепарации: какой из критериев, определенных ранее, необходимо использовать в конкретных условиях разделения [4]. Попробуем разобраться в этом.

ТУРБУЛЕНТНЫЕ РЕЖИМЫ ОБТЕКАНИЯ

Известно, что динамическое воздействие потока на твердую единичную частицу в этих условиях составит

$$F = \lambda \frac{\pi d^2}{4} \rho_0 \frac{(u_r - v_r)^2}{2},$$

где F — сила воздействия; λ — коэффициент сопротивления частицы; r — характерная координата произвольной точки поперечного сечения аппарата, м; u_r — локальная скорость движения среды в точке с координатой r , м/с; v_r — локальная скорость движения частицы в той же точке, м/с.

За положительное направление скорости v_r и u_r принимается вертикальное направление движения потока.

Условие равновесия в установившемся режиме для частицы составляет

$$\frac{\pi d^3}{6} q(\rho - \rho_0) = \lambda \frac{\pi d^2}{4} \rho_0 \frac{(u_r - v_r)^2}{2},$$

или

$$u_r - v_r = w \sqrt{\frac{4}{3\lambda} B}, \quad (1)$$

где q — плотность твердого материала; B — обобщенный параметр классификации для турбулентных режимов, $B = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \cdot \frac{qd}{w^2}$.

Турбулентный режим обтекания частицы характеризуется постоянством коэффициента сопротивления ($\lambda = 0,5$).

Для этого случая критерий Рейнольдса для частицы на основании опытных данных $Re_p \geq 500$, т. е.

$$\frac{(u_r - v_r)}{\mu} \geq 500.$$

Отсюда с учетом зависимости (1) будем иметь

$$\frac{w \sqrt{\frac{4}{3\lambda} B} d \rho_0}{\mu} \geq 500. \quad (2)$$

Условие (2) с учетом $\lambda = 0,5$ соответствует выражению

$$\sqrt{\frac{8}{3}} Ar \geq 500,$$

где Ar — критерий Архимеда, $Ar = \frac{qd^3(\rho - \rho_0)\rho_0}{\mu^2}$; из этого выражения следует $Ar \geq 93750$.

Применительно к воздушной среде в обычных температурных условиях ($\mu = 1,75 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с), $\rho_0 = 12$ кг/м³) размер частиц, характеризующийся турбулентным обтеканием, при осаждении в неподвижной среде составит

$$d \geq 10^{-3} \sqrt{\frac{2550}{\rho}}.$$

Отсюда следует, что для кварцита ($\rho = 2600$ кг/м³) в режиме турбулентного обтекания находятся частицы размерами $d \geq 1$ мм.

Из условия (2) имеем

$$\frac{\rho_0}{\mu} \geq \frac{500}{w \sqrt{\frac{4}{3\lambda} B} d} \quad (3)$$

Подставим это выражение в формулу Рейнольдса для потока:

$$Re_D = \frac{D}{d} \cdot \frac{500}{\sqrt{\frac{4}{3\lambda} B}} \quad (4)$$

Условие (4) позволяет оценить режим движения среды в сепараторе при турбулентном обтекании частиц.

Очевидно, что оценку $(Re_D)_{\min}$ нужно проводить по $d_{\max}$, при котором $B = B_{\max}$. Экспериментально установлено, что при классификации материалов до крупности порядка $d \sim 60$ мкм для всех монофракций $B_{\max} = 2,7 \div 3,0$ и мало зависит от конструкции аппарата. Отношение D/d имеет порядок 10^2 для экспериментальных аппаратов и на порядок больший для промышленных.

С учетом $\lambda = 0,5$ из условия (4) можно получить $(Re_D)_{\min} \geq 1,75 \cdot 10^4$. Для аппарата с $D = 100$ мм при $w = 1,0$ м/с для частиц с $d \sim 100$ мкм $Re \geq 10^4$.

Таким образом, в условиях турбулентного обтекания частиц весь процесс (от выхода мелочи $\gamma_f = 0$) практически идет при турбулентном режиме движения среды в сепараторе. Это подтверждается надежным обобщением кривых разделения при помощи критерия B .

ЛАМИНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ОБТЕКАНИЯ ЧАСТИЦ

Такие режимы могут иметь место при воздушной классификации мелких порошков или при мокрых режимах разделения.

Для частицы при ламинарном обтекании можно записать

$$Re_p = \frac{(u_r - v_r)d\rho_0}{\mu} \leq 1. \quad (5)$$

Условия равновесия при обтекании для частицы составят

$$\frac{\pi d^3}{6} q(\rho - \rho_0) = 3\pi\mu(u_r - v_r)d.$$

С учетом равенства (5) это выражение можно преобразовать к виду $Ar = 18Re$ или $Ar \leq 18$. В условиях воздушной среды это справедливо для частиц размерами

$$d \leq 10^{-3} \sqrt[3]{\frac{0,4954}{\rho}}.$$

Так, для кварцита это будут частицы $d \leq 57$ мкм. Из равенства (5) следует

$$\frac{\rho_0}{\mu} \leq \frac{1}{(u_r - v_r)d}.$$

Подставим это выражение в формулу Re_D для потока (4):

$$Re_D \leq \frac{D}{d} \cdot \frac{w}{(u_r - v_r)}. \quad (6)$$

Известно, что коэффициент сопротивления частицы при ее ламинарном обтекании составляет

$$\lambda = \frac{24}{Re_p} = \frac{24\mu}{(u_r - v_r)d\rho_0}.$$

С учетом этого из зависимости (1) следует

$$\frac{u_r - v_r}{w} = \sqrt{\frac{4}{3} B \frac{(u_r - v_r)d\rho_0}{24\mu}},$$

отсюда

$$\frac{u_r - v_r}{w} = \frac{1}{18} Re_p \cdot B.$$

Учитывая, что $Re_p^2 B = Ar$, получим

$$\frac{u_r - v_r}{w} = \frac{\sqrt{Ar \cdot B}}{18}.$$

Подставим полученное выражение в формулу (6):

$$Re_D \leq \frac{D}{d} \frac{18}{\sqrt{Ar \cdot B}}.$$

Поскольку для ламинарного режима $Ar \leq 18$, окончательно получим

$$Re_D \leq 10^3 \div 10^4.$$

Таким образом, области ламинарного и турбулентного обтекания частиц перекрываются режимами движения потока. Очевидно, что протекающий поток несколько изменяет картину обтекания частиц, наблюдающуюся при их осаждении в неподвижной среде.

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КРИВЫЕ

Это приводит к тому, что весь диапазон разделения порошков можно описать двумя критериями подобия:

· для крупнозернистых материалов (турбулентное обтекание)

$$B = \frac{qd(\rho - \rho_0)}{w^2 \rho_0},$$

· для мелкодисперсных порошков

$$Ba = \frac{qd^2(\rho - \rho_0)}{\mu w}.$$

Наиболее наглядно это можно проиллюстрировать конкретными примерами. Возьмем два различных по гранулометрии и плотности материала, состав которых приведен в табл. 1 и 2.

Фракционирование алюминиевого порошка проводили на каскадном полочном классификаторе (рис. 1), состоящем из десяти ступеней, с подачей исходного материала в середину, т. е. на 5-ю ступень. Было выполнено шесть опытов, в которых скорость восходящего потока воздуха принимала следующие значения: 0,27, 0,36, 0,51, 0,9, 1,32 и 17 м/с.

По результатам этих опытов построена зависимость (рис. 2)

$$F_f(x) = \varphi(Ba),$$

где $F_f(x)$ — фракционное разделение каждого узкого класса крупности, %; Ba — критерий подобия для ламинарного обтекания частиц.

Как следует из рис. 2, все опытные точки для всех узких классов крупности ложатся на одну кривую, что обеспечивает получение универсальной характеристики процесса.

Фракционирование оксида хрома также проводили на каскадном классификаторе, состоящем из пяти ступеней, с подачей исходного материала на 3-ю ступень. Было выполнено пять опытов, в которых скорость восходящего потока принимала следующие значения: 2,7, 3,0, 3,25, 4,15 и 4,75 м/с.

По результатам этой группы опытов построена зависимость (рис. 3)

$$F_f(x) = \varphi(B),$$

где B — критерий подобия для турбулентного обтекания частиц.

Таблица 1. Гранулометрический состав алюминиевого порошка ($\rho = 2700$ кг/м³)

Средний размер частиц d , мкм	10	25	40	56,5	71,5	90	112,5	142,5	180	215
Содержание класса крупности r_i , %	3,6	72	17,0	8,2	7,8	6,7	6,5	7,5	7,8	27,7

Таблица 2. Гранулометрический состав оксида хрома ($\rho = 3600$ кг/м³)

Средний размер частиц d , мкм	25	56,5	81,5	130	180	258	358	515	815	1300	2050	3750
Содержание узкого класса r_i , %	10,7	4,3	5,9	6,9	4,1	9,7	7,1	11,4	11,2	11,1	14,3	3,2

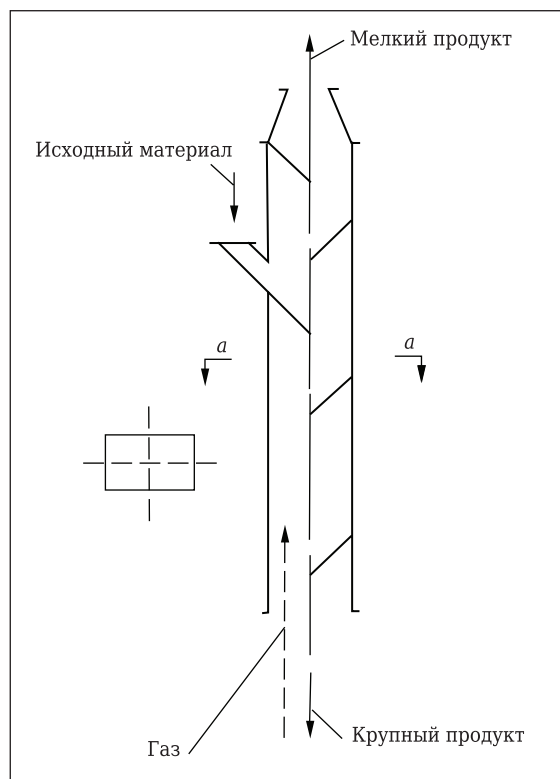


Рис. 1. Принципиальная схема полочного каскадного классификатора

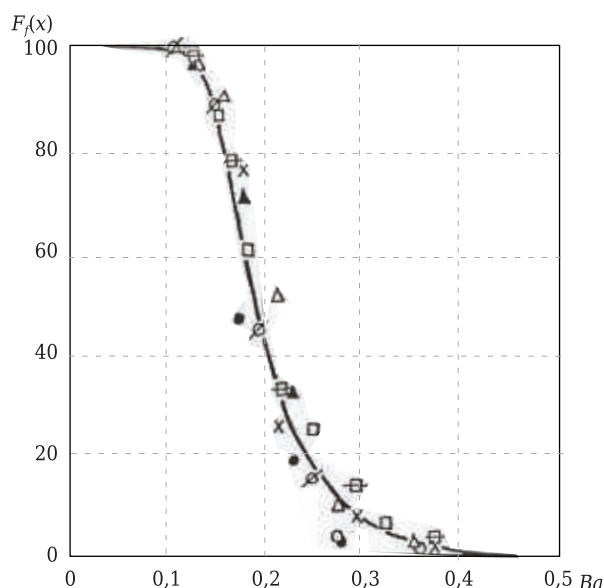


Рис. 2. Зависимость фракционного разделения разных узких классов крупности для алюминиевой пыли от параметра Ba

И в этом случае, как следует из рис. 3, все опытные значения обеспечивают получение универсальной кривой разделения для всех узких классов крупности. По этим универсальным кривым можно получить любую информацию о параметрах процесса и конструкции аппарата: оптимальные режимы, выход продук-

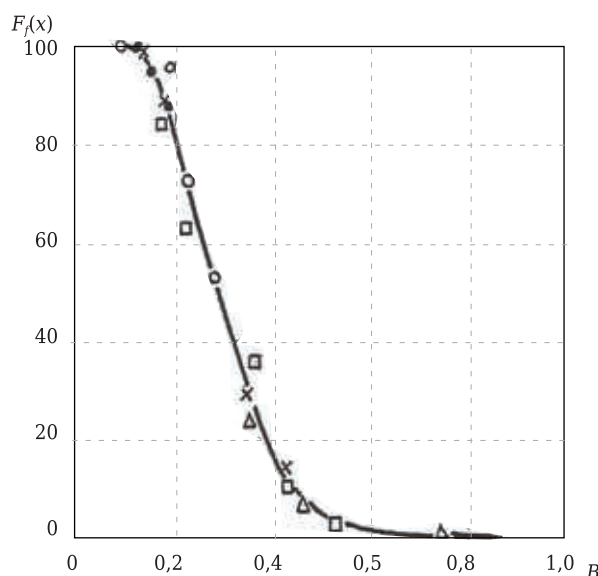


Рис. 3. Зависимость фракционного разделения разных узких классов крупности для оксида хрома от параметра B

тов, их составы, разделительную способность конструкции и т. д.

Самое интересное заключается в том, что каждую из этих универсальных кривых в принципе можно получить из одного опыта, т. е. в каждом опыте заключена вся информация как о процессе сепарации, так и о конструкции сепаратора [5]. Однако для надежности необходимо провести несколько экспериментов. Эти универсальные кривые являются основой для расчета результатов процесса, его оптимизации и прогнозирования гранулометрического состава продуктов разделения. Они являются также характеристикой разделительной способности конструкции классификатора, что позволяет объективно сравнивать между собой как аналогичные по принципу действия аппараты, так и работающие на базе разных физических процессов.

Библиографический список

1. **Barsky, E.** Cascade separation of powders / E. Barsky, M. Barsky. — Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2006.
2. **Barsky, E.** Critical regimes of two-phase flows with a polydisperse solid phase / E. Barsky. — Berlin : Springer, 2010.
3. **Barsky, E.** Conditions of optimality for process of separation of pourable materials : proceeding of the XXII International Mineral Processing Congress, Cape Town, 2003.
4. **Айништейн, В. Г.** Общий курс процессов и аппаратов химической технологии / В. Г. Айништейн. — М. : Логос, Высшая школа, 2002.
5. **Barsky, E.** Entropy of complex processes and systems / E. Barsky. — London : Elsevier, 2020. ■

Получено 04.11.20
© Е. М. Барский, 2021 г.