

УДК 622.7

П.И. ПИЛОВ, д-р техн. наук
(Украина, Днепр, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")**СКОРОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ МИНЕРАЛОВ В ВОДЕ
С УЧЕТОМ ИХ ФОРМЫ И СМАЧИВАЕМОСТИ ИХ ПОВЕРХНОСТИ**

Скорость движения минеральных частиц в жидкой среде зависит, кроме крупности и плотности, от их формы, а также свойств поверхности межфазного контакта. Ключевым вопросом в этом является сила сопротивления движению, которая по Ньютону равна

$$R = \lambda S v^2 \Delta / 2 ,$$

где λ – коэффициент сопротивления жидкой среды движению твердой частицы; S – площадь миделева сечения движущейся частицы; v – скорость движения твердой частицы относительно жидкой среды; δ, Δ – соответственно, кажущая плотность твердой частицы и плотность жидкой среды.

Коэффициент сопротивления среды движению частиц $\lambda = \pi/8$ зависит от скорости их обтекания и, соответственно, от критерия Рейнольдса. В гидравлике эта зависимость представляется кривой Релея, полученной на основе экспериментальных исследований, в которых использовались стеклянные шарики разного размера со своими, присущими им, поверхностными свойствами. Очевидно, использование шариков из других материалов даст другие значения их скоростей при одинаковой крупности и плотности.

Сложный характер зависимости коэффициента сопротивления жидкости от критерия Рейнольдса не позволяет создать универсальной формулы для расчета скорости движения частиц. Частные решения возможны для автомоделных областей. Их вид будет определяться функцией, принятой для аппроксимации соответствующего участка кривой Релея.

Однако это не решает проблему, которая состоит в том, что выбор формулы необходимо осуществлять исходя из значения критерия Рейнольдса, а оно определяется искомой скоростью. Эта неопределенность устраняется в универсальном методе, основанном на использовании критериев, не связанных с критерием Рейнольдса. Одним из таких критериев является безразмерный параметр П.В. Лященко [4], значение которого определяется только лишь свойствами движущейся частицы и жидкой среды:

$$La = Re^2 \psi = G_0 \Delta / \mu^2 ,$$

при этом: $\psi = \lambda(\pi/8)$ – модифицированный коэффициент сопротивления;

Гравітаційна сепарація

$Re = vd\Delta / \mu$ – критерий Рейнольдса; G_0 – вес движущейся частицы в жидкой среде, равный разности силы веса частицы и выталкивающей силы Архимеда; Δ – плотность жидкости; μ – ее коэффициент динамической вязкости; d – эквивалентная крупность частиц.

П.В.Лященко на основе диаграммы Релея получил диаграмму $La(Re)$, не включающую в явном виде коэффициент сопротивления ψ или λ . Ранее нами было получена функция $Re(La)$ с использованием для ее описания кусочно-линейной аппроксимации в логарифмических координатах [1].

Но появление новой информации и новые возможности информационных технологий создали предпосылки для дальнейшего развития такого подхода. Сейчас нами предлагается принять нормированные показатели степени в зависимости $Re = (A \cdot La)^m$, равными 1, 2/3 и 1/2, а значение коэффициента A подобрать для соответствующих диапазонов изменения La исходя из обеспечения максимально возможной точности. В результате компьютерной обработки данных из диаграммы Лященко получено:

Диапазон La	A	m
<42	0,105	1
42...117000	0,22	2/3
>117000	6,5	1/2

Таким образом, вычислив параметр La можно найти значение критерия Рейнольдса и, затем, скорость:

$$v = (ALa)^m \mu / (d\Delta) \sim d^{3m-1}.$$

Анализ полученной формулы показывает, что при значениях m , равных 1; 2/3 и 1/2, соответственно, получаются известные формулы Стокса, Алена и Ньютона-Риттингера, которые описывают частные случаи скорости движения минеральных зерен при различных режимах их обтекания жидкой средой.

В отличие от свободных условий стесненное движение осуществляется в ограниченном объеме жидкости и в присутствии других частиц. При движении совокупности минеральных зерен в жидкости, она полностью заполняет все свободное пространство между ними. Т.е. жидкость одновременно обтекает все зерна и движется внутри каналов неправильной формы, образуемых пустотами и порами между зернами

Исходя из сопротивления зернистого слоя движению жидкости (по аналогии с сопротивлением течению жидкости в трубах) получено выражение для скорости стесненного движения [2, 5]:

$$v_{cm} = Re_{cm} \mu / (d\Delta) = v_0 \Theta^{3m},$$

где v_0 – скорость свободного падения частиц; $\Theta = 1 - c_v$ – коэффициент разрыхления зернистого слоя; c_v – объемная концентрация твердой фазы.

Сравнение расчетных скоростей падения минеральных зерен в воде с результатами экспериментальных исследований, выполненных Т.Г. Фоменко [3], показало (таблица), что при числе Рейнольдса, меньшем некоторого значения ($Re < Re'$) их отношение имеет постоянное значение k_1 , характерное для зерен данного минерала. При $Re > Re''$ отношение скоростей также постоянно, однако имеет иное значение k_2 , чем в предыдущей области.

Сравнение расчетных и измеренных скоростей падения частиц минералов

Минерал	R'	R''	k_1	k_i	k_2
Кварц	1	6	1,13	1,22	1,93
Касситерит	0,52	6	0,93	0,98	1,91
Галенит	0,55	10	0,94	0,68	1,56
Золото	3	6	1,21	0,98	1,136
Уголь	3	6	0,69	1,36	2,24
Антрацит	0,06	4	0,79	1,40	2,64

Когда значение критерия Рейнольдса принимает промежуточное значение ($Re' > Re > Re''$), соотношение скоростей также меняется от значений, характерных для области $Re < Re'$, до значений, характерных для $Re > Re''$.

Вязкая жидкость на поверхности движущегося в ней твердого тела образует относительно тонкий слой, называемый пограничным слоем, который прилипает к твердому телу и движется с такой же скоростью, как и само тело. Градиенты скорости по нормали к поверхности тела в пограничном слое значительны, поэтому поверхностные напряжения и силы вязкого трения со стороны пограничного слоя на тело принимают существенные значения, несмотря на его относительную тонкость.

Меру прилипания пограничного слоя к поверхности твердого тела определяет смачивание – физическое взаимодействие *жидкости* с поверхностью *твёрдого тела* или другой жидкости. В нашем случае мы рассматривать иммерсионное смачивание, когда вся поверхность твёрдого тела контактирует с жидкостью. Смачивание характеризуется краевым углом смачивания и зависит от соотношения между силами сцепления *молекул* жидкости с молекулами (или *атомами*) смачиваемого тела (*адгезия*) и силами взаимного сцепления молекул жидкости (*когезия*).

При малой скорости движения ($Re < Re'$) минеральная частица покрыта пограничным слоем и выглядит при движении как гидравлически гладкая.

С увеличением скорости происходит уменьшение и отрыв пограничного слоя, поэтому начинают влиять форма минеральной частицы и шероховатость ее поверхности. Это влияние, судя по кинетике движения, полностью проявляется при $Re > Re''$, поскольку характер влияния остается неизменным.

Установлено, что поправка k_1 обусловлена поверхностными свойствами

Збагачення корисних копалин, 2016. – Вип. 63(104)

Гравітаційна сепарація

минералов и зависит от краевого угла смачивания Θ . Из результатов обработки экспериментальных данных следует, что уравнение линии тренда имеет вид: $k_1 = 1,17 - 0,0056\Theta$ при значении коэффициента надежности аппроксимации $R^2 = 0,9688$.

У поправки k_2 корреляционной связи с краевым углом смачивания не обнаружено, однако она является специфической для данного минерала и практически неизменной для всего диапазона $Re > Re''$.

Поэтому в расчет скорости при $Re < Re'$ следует вводить поправку k_1 , обусловленную поверхностными свойствами минералов. При $Re > Re''$ – поправку k_2 на форму зерен и шероховатость их поверхности.

Таким образом, с учетом поправок расчетная скорость движения минеральных зерен будет равна:

$$v = (Re \mu) / (k_i d \Delta) \text{ или } v = v_p / k_i,$$

где v_p – расчетное значение скорости.

При стесненном движении минеральных частиц вокруг каждой частицы также имеется пограничный слой, который занимает часть объема свободной жидкости в межчастичном пространстве. Поскольку эта часть пропорциональна произведению удельной поверхности межфазного контакта s и толщины пограничного слоя, то коэффициент разрыхления в формуле для скорости стесненного падения будет равен

$$\Theta = 1 - c_v (1 + \lambda s).$$

При определенном сочетании c_v, λ, s межчастичные промежутки становятся настолько малыми, что это приводит к объединению пограничных слоев соседних частиц и формированию пакетов частиц, движущихся как одно целое.

Система "поверхность твердого тела – пограничный слой" в установившемся процессе осаждения находится в равновесии. При внесении возмущения, например, ускорения или замедления перемещения жидкой среды, использование вибраций и других физических воздействий, равновесие нарушается, а затем (спустя некоторое время) система возвращается в исходное состояние. Такой гистерезис в равной мере относится и к смачиванию.

Выполненные исследования показали, что, несмотря на сложность процесса движения минеральных частиц в жидкой среде, возможно, путем введения поправочных коэффициентов, уточнение методики расчета скорости и механизма движения полидисперсной и полиминеральной твердой фазы, в том числе за счет влияния на краевой угол смачивания сорбции поверхностью мине-

ральных частиц других веществ, включая специально подобранные реагенты.

Список литературы

1. Бедрань Н.Г., Денисенко А.И., Пилов П.И. Расчет скорости свободного движения минеральных зерен в среде // Изв. вузов. Горный журнал. – 1976. – № 9. – С. 141-144.
2. Бедрань Н.Г., Денисенко А.И., Пилов П.И. Расчет скорости стесненного движения минеральных зерен в среде // Изв. вузов. Горный журнал. – 1979. – № 1. – С. 169-171.
3. Благоев И.С., Коткин А.М., Фоменко Т.Г. Гравитационные процессы обогащения. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 232 с.
4. Ляшенко П.В. Гравитационные методы обогащения, 2 изд. – М.-Л.: Гостоптехиздат, 1940.
5. Пилов П.И. Анализ сепарационных эффектов в полидисперсных суспензиях // Горн. информ.-анал. бюл. – 1997. – № 4. – С. 79-82.

© Пилов П.И., 2016

*Надійшла до редколегії 02.09.2016 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*