

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

А. М. Гаспарян и А. А. Заминян

О стесненном падении шарообразных частиц

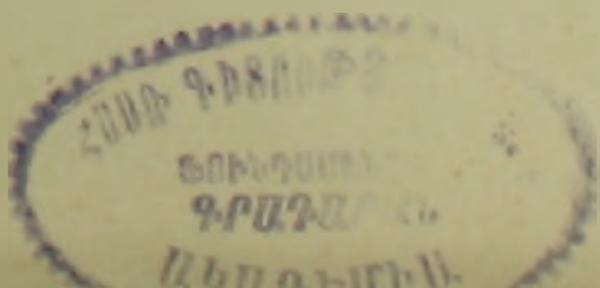
(Представлено Н. Х. Арутюняном 25. VII. 1955)

Закономерности падения отдельной шарообразной частицы в бесконечной среде найдены и изучены достаточно полно. При значениях критерия Рейнольдса (Re) меньше единицы скорость падения частицы вполне точно определяется известным уравнением Стокса. При значениях Re больше единицы могут быть использованы другие, менее точные уравнения, а также кривые Релея или Лященко.

Под выражением „падение в бесконечной среде“ подразумевается, что стенки сосуда или другие частицы, падающие одновременно в том же пространстве, не оказывают влияния на падение данной частицы. Обобщая исследования по этому вопросу, Н. А. Фигуровский⁽¹⁾ показал, что влияние стенок и других частиц на падение данной частицы незаметно, если расстояние между ними превышает 10-кратную величину диаметра частицы. Это означает, что при совместном падении частиц их скорость может быть определена по вышеуказанным уравнениям или кривым, если объемная доля φ частиц в среде не превышает 0,000523. При большей концентрации падающих совместно частиц их взаимное влияние приводит к уменьшению скорости падения и возникает так называемое стесненное падение.

Закономерности стесненного падения представляют большой интерес для техники обогащения полезных ископаемых, для химической технологии и для некоторых других отраслей техники и промышленности. Выяснению этих закономерностей посвящено значительное число исследований различных авторов и предложен ряд уравнений. Большинство этих исследований и уравнений касается отдельных частных случаев, а более общие уравнения различных авторов приводят к результатам, резко расходящимся между собой.

В излагаемом исследовании сделана попытка найти уравнения для расчета с достаточной точностью скорости стесненного падения шарообразных частиц в широком интервале критерия Рейнольдса.



Эксперименты и обработка материала. Для измерений скоростей стесненного падения использовался метод взвешенного слоя, описанный П. В. Лященко (²), Д. М. Минцем (³), Н. И. Смирновым и Ли Дэ Эп (⁴) и другими. Надежность этого метода была проверена другим, более сложным, но более обоснованным способом измерения этих скоростей.

Измерения производились с узкими фракциями стеклянных шариков с диаметрами от 50 до 300 микронов, а также со свинцовыми шариками, в пределах значений Re_0 (см. ниже) от 0,012 до 700. Данные для составления последних двух строк табл. 1 взяты из книги П. В. Лященко, предполагая что опыты им проведены при температуре около 20°C.

Было проведено 18 серий опытов (более 1000 измерений скоростей стесненного падения) в потоке воды при различных температурах (от 10 до 95°C), а также в потоке глицеринового раствора.

Экспериментальный материал был обработан, исходя из допущения, что

$$\beta = \frac{c}{c_0} = f(Re), \quad (1)$$

где c — скорость стесненного падения (равная скорости среды, отнесенной к общему сечению трубки), см/сек.,

c_0 — скорость падения в бесконечной среде, см/сек.

Как известно, критерий Рейнольдса для отдельной частицы, падающей в бесконечной среде (обозначим его через Re_0), будет:

$$Re_0 = \frac{c'_0 d \rho}{\mu}$$

По аналогии с этим, для отдельной частицы, находящейся во взвеси, значение этого же критерия можно написать в виде:

$$Re = \frac{c' d \rho}{\mu} = \frac{c d \rho}{m \mu}, \quad (2)$$

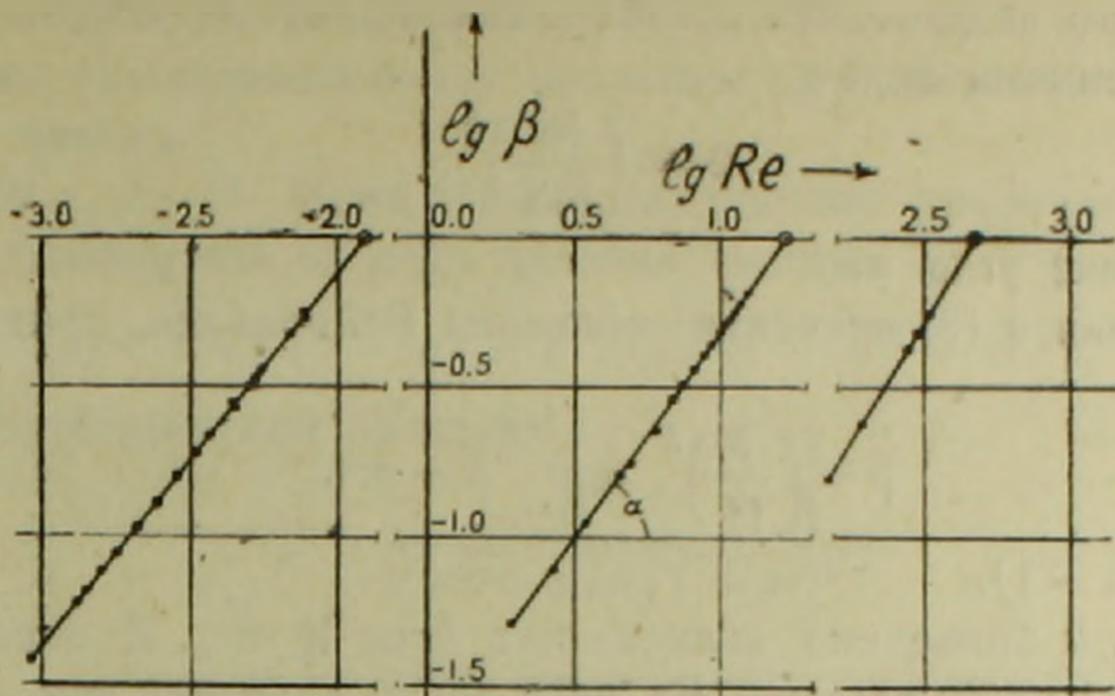
где: $c' = c : m$ — есть приближенная средняя скорость среды во взвеси, равная скорости падения отдельной частицы, см/сек.,

d — средний диаметр частиц данной фракции, см,

ρ и η — плотность г/см³ и вязкость в пуазах среды,

m — объемная доля среды во взвеси (пористость).

Значения c и m получались из опытов: c_0 определялась по крупномасштабной кривой Лященко: d определялся при помощи микроскопа, а величины ρ и μ брались из справочников. По подсчитанным значениям β и Re составлялся график $\lg \beta = f(\lg Re)$ для каждой серии опытов (см. табл. 1). Выяснилось, что эта взаимосвязь имеет вид прямой линии. На рис. 1 приведены три примера.



Взаимосвязь $\lg \beta = f(\lg Re)$

Рис. 1.

Таблица 1

Основные показатели опытов и полученные результаты.

№№ п/п	Диаметр трубки в см	d см	Среда		C _n см/сек	Re ₁	tga или k
			μ пуаз	ρ г/см ³			
1	1,275	0,00598	0,01	1,0	0,403	0,282	1,24
2	0,980	0,00698	0,00576	0,993	0,602	0,616	1,25
3	0,980	0,00698	0,00486	0,984	0,707	1,000	1,26
4	0,980	0,00698	0,00315	0,965	1,02	2,19	1,30
5	0,980	0,00598	0,0485	1,124	0,0764	0,01235	1,24
6	1,275	0,00887	0,01	1,0	0,650	0,577	1,24
7	0,980	0,0117	0,0103	1,0	0,942	1,070	1,27
8	0,980	0,0117	0,0057	0,99	1,480	1,050	1,32
9	0,980	0,0177	0,0035	0,97	2,18	7,08	1,32
10	1,275	0,01274	0,01	1,0	1,11	1,41	1,30
11	1,275	0,01805	0,01	1,0	1,99	3,60	1,31
12	1,275	0,0232	0,01	1,0	2,96	6,86	1,36
13	0,980	0,02626	0,00654	0,992	4,36	17,40	1,38
14	0,980	0,02626	0,00435	0,980	5,22	30,9	1,37
15	0,980	0,02626	0,00333	0,969	5,94	45,2	1,407
16	1,566	0,092	0,0122	1,0	45,0	339	1,486
17	1,566	0,115	0,0122	1,0	53,0	500	1,520
18	1,566	0,1436	0,0122	1,0	60,0	708	1,520
19	4,70	0,555	0,01	1,0	51,0	2830	1,520
20	4,70	0,730	0,01	1,0	49,6	3620	1,510

Примечания: 1. Опыты 1—15 проведены со стеклянными шариками плотностью 2,52 г/см³.
 2. Опыты 16,17 и 18 проведены со свинцовыми шариками плотностью 11 г/см³.
 3. Опыты 19 и 20 выполнены П. В. Лященко со стеклянными шариками плотностью 2,5 и 2,36 г/см³.

Нетрудно видеть, что прямые линии (рис. 1) могут быть выражены уравнениями вида

$$\beta = \left(\frac{Re}{Re_0} \right)^k, \quad (3)$$

где k — тангенс угла α .

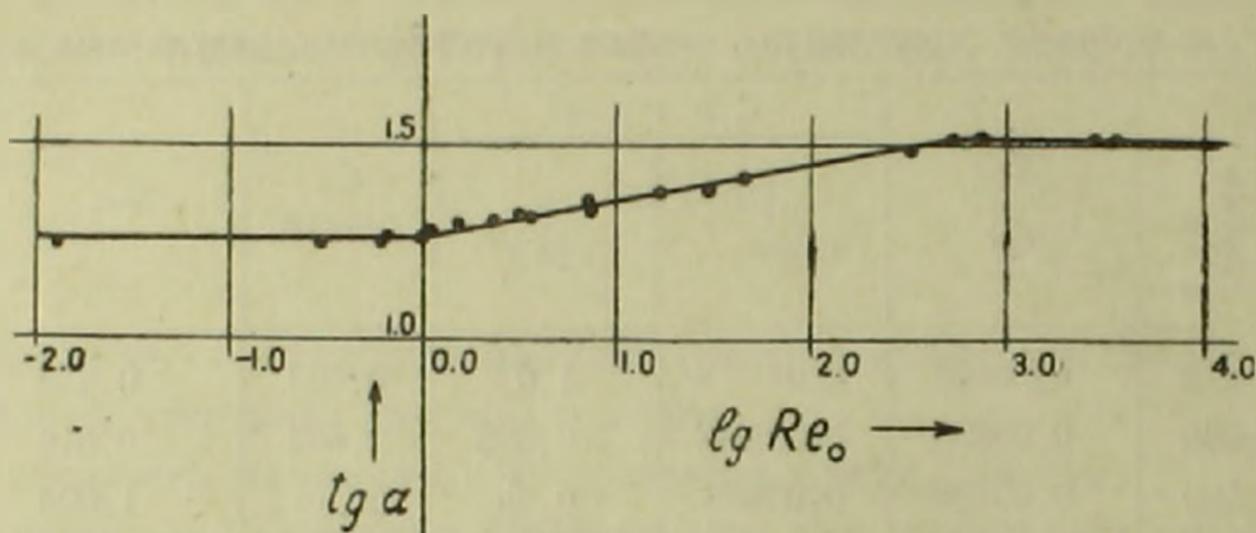
Подставив в (3) значения критерия Рейнольдса, приходим к выражению:

$$\beta = \left| \left(\frac{\beta}{m} \right)^k \right| \text{ или } \beta = m^n, \quad (4)$$

где $n = k : (k - 1)$.

На рис. 2 приведена зависимость k от $\lg Re_0$. В переходной области ($Re_0 = 1 \div 500$) влияние Re_0 на k значительное и оно выражается уравнением

$$\operatorname{tg} \alpha = k = 1,25 + 0,1 \lg Re_0. \quad (5)$$



Взаимосвязь $\operatorname{tg} \alpha = k = \psi(\lg Re_0)$

Рис. 2.

В области $Re_0 = 0,012 \div 1$ изменение k незначительно (от 1,24 до 1,26). Его среднее значение составляет 1,25 и для этой области получается

$$\beta = m^5. \quad (6)$$

Для значений $Re_0 = 500$ и более k имеет постоянное значение, равное 1,52 и для этой области

$$\beta = m^{2,93}. \quad (7)$$

Так как $s = \beta \cdot c_0$, то при помощи уравнений (6), (5) и (7) можно определить скорости стесненного падения шарообразных частиц для любой их объемной доли $\varphi = 1 - m$.

Сравнение с другими данными. Обзор литературы показывает, что полученные нами результаты сравнительно близки к данным П. В. Лященко⁽²⁾ и Д. М. Минца⁽⁵⁾.

Уравнение вида (4) впервые было предложено П. В. Лященко для определения скорости стесненного падения помолов различных минералов. П. В. Лященко приводит опытные значения степени n для ряда частных случаев. Они колеблются от 2,5 до 3,8.

Однако сопоставление данных П. В. Лященко с полученными нами данными невозможно ввиду неодинаковости объектов исследований по форме частиц.

В 1952 г. Д. М. Минц ⁽⁵⁾ дал следующие уравнения. Для ламинарной области падения частиц:

$$\beta = -4,5(1-m) + \sqrt{20,25(1-m)^2 + m^3} \quad (8)$$

Для турбулентной области:

$$\beta = \frac{m^2}{\sqrt{m + 3,14(1-m)^2}} \quad (9)$$

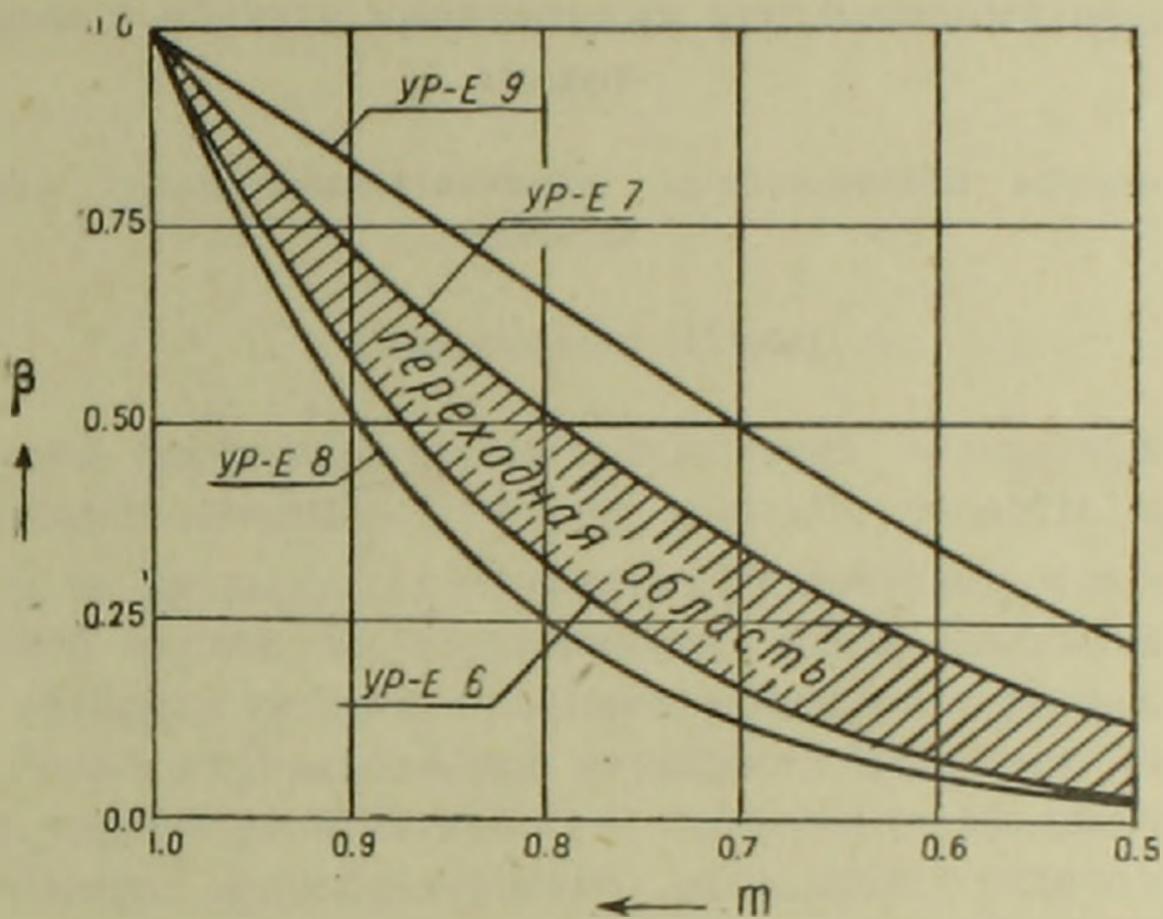


Рис. 3.

Сравнение уравнений Д. М. Минца с уравнениями (6) и (7) приведено на рис. 3.

Химический институт Академии наук
Армянской ССР

Ա. Մ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ ԵՎ Ա. Ա. ԶԱՄԻՆՅԱՆ

Գնդաձև մասնիկների կաշկանդված անկման մասին

Մասնիկների կաշկանդված անկման օրինաչափությունները մեծ կարևորություն ունեն օգտակար հանածոների հարստացման տեխնիկայում, քիմիական արդյունաբերության մեջ և այլ ասպարեզներում: Այդ օրինաչափություններին նվիրված են մի շարք հետազոտություններ և առաջարկված են բանաձևեր: Այս վերջինների ուսումնասիրությունը ցույց է տալիս, որ տարբեր հեղինակների բանաձևերը տալիս են խիստ տարբեր արդյունքներ:

Ներկա ուսումնասիրությունը ցույց է տրված, որ գնդաձև մասնիկների կաշկանդված անկման արագությունը լավ ճշտությամբ կարելի է հաշվել (5), (6), և (7) բանաձևերով:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ Н. А. Фигуровский, Седиментометрический анализ, стр. 76, 1948, ² П. В. Лященко, Гравитационные методы обогащения, гл. 8, 1940. ³ Д. М. Минц, ДАН СССР, 82, №1, 1952. ⁴ Н. И. Смирнов и Ли Дэ Эл, ЖПХ, 24, 56, 383, 439, 1951, ⁵ Д. М. Минц, ДАН СССР, 83, № 4, 1952.