

СТЕСНЕННОЕ ОСАЖДЕНИЕ ТВЕРДЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

Известен ряд работ по исследованию влияния стенок сосудов на движение шара. Обстоятельный обзор по исследованию влияния стенок сосуда на движение шара дан в работах [1—4]. Имеющаяся литература в хронологическом порядке располагается следующим образом [4]: Ньютон — 1687 г., Монро — 1888 г., Ладенбург — 1907 г., Шепард — 1917 г., Факсен — 1921 г., Луннон — 1928 г., Шмидель — 1928 г., Барр — 1931 г., Френсис — 1933 г., Фульмер и Вильямс — 1936 г., Гуреев — 1951 г., Мот — 1951 г. Некоторые данные о стесненном

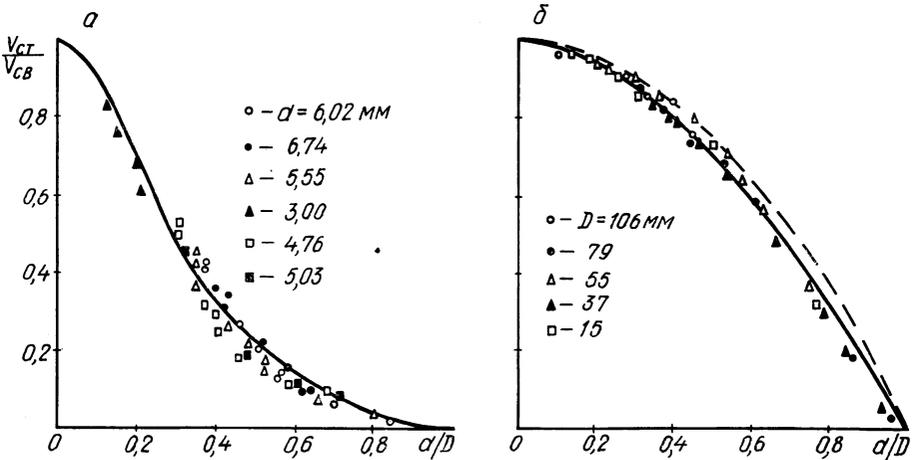


Рис. 1. Стесненное падение стальных ($\rho_1=7,8 \text{ г/см}^3$) шаров: а — в глицерине ($\mu=14,99 \text{ пуаз}$; $\rho=1,258 \text{ г/см}^3$); б — в воде ($\mu=0,01 \text{ пуаз}$; $\rho=1,0 \text{ г/см}^3$) на а сплошная кривая — теоретическая при $n=11,3$; на б сплошная кривая — теоретическая при $n=1,225$, пунктирная — то же при $n=1,0$; $v_{ст}$ — скорость стесненного осаждения; $v_{св}$ — то же свободного.

стенками сосуда осаждению отдельных твердых и жидких частиц приводятся в работах [5—7]. В работе [4] дается обзор большинства предлагаемых формул, из которого следует, что общей зависимости для определения поправки на влияние стенок сосуда для всего диапазона чисел Рейнольдса не установлено. В общем при $d/D \leq 0,05$ влияние стенок сосудов на скорость движения шара незначительно.

В известных эмпирических формулах замедляющий эффект стенок учитывается введением в формулу безразмерного отношения d/D (d — диаметр шара, D — диаметр сосуда). В работе [6], где приведены данные довольно точных измерений скорости стесненного осаждения ($v_{ст}$ металлических шаров и природных частиц в воде, предлагается производить расчет скорости по формуле Монро, которая учитывает влияние стенок сосуда лишь соотношением d/D . Вместе с тем установлено [7],

что влияние стеснения нельзя оценивать только безразмерным соотношением d/D . Это особенно становится очевидным, если сопоставить опытные графики зависимости $\frac{v_{ст}}{v_{св}} = f(d/D)$ для случаев движения шаров в воде и глицерине (рис. 1).

Общую зависимость $\frac{v_{ст}}{v_{св}} = f(d/D)$ можно получить исходя из следующих соображений [8]: предположим, что шар за элементарный про-

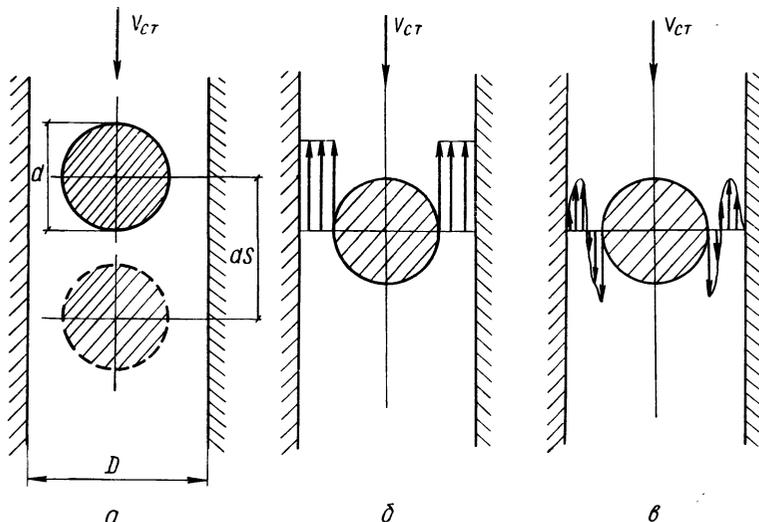


Рис. 2. Схема стесненного осаждения шаров (а) в идеальной жидкости (б) и в вязкой (в).

межуток времени dt проходит отрезок пути ds . Объем вытесненной шаром жидкости за время перемещения dt будет равен объему жидкости, перетекающей в кольцевом пространстве за тот же промежуток времени (рис. 2, а), т. е.

$$\frac{\pi d^2}{4} ds = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) dt \bar{v}_n, \quad (1)$$

где v_n — средняя скорость перетекания жидкости в кольцевом пространстве площадью $\frac{\pi D^2 - \pi d^2}{4}$.

Если вообразить движение шара в идеальной (лишенной сил трения) жидкости, то в этом случае величина скорости перетекания в любой точке кольцевого пространства будет одинаковой (рис. 2, б) и равной

$$v'_n = v_{св} - v_{ст}. \quad (2)$$

В случае движения шара в вязкой среде при наличии прилипания частиц жидкости к поверхности шара и стенкам сосуда эпюра распределения скоростей становится сложной (рис. 2, в), а средняя скорость перетекания жидкости в кольцевом пространстве в n раз меньше, чем в случае движения шара в идеальной жидкости:

$$v_n = \frac{v'_n}{n} = \frac{v_{св} - v_{ст}}{n}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1), получим

$$\frac{v_{ст}}{v_{св}} = \frac{D^2/d^2 - 1}{n + D^2/d^2 - 1} \quad (4)$$

Для проверки справедливости формулы (4) и выявления значений коэффициента n было проведено три серии опытов. В первой серии опытов было исследовано стесненное движение стальных шаров

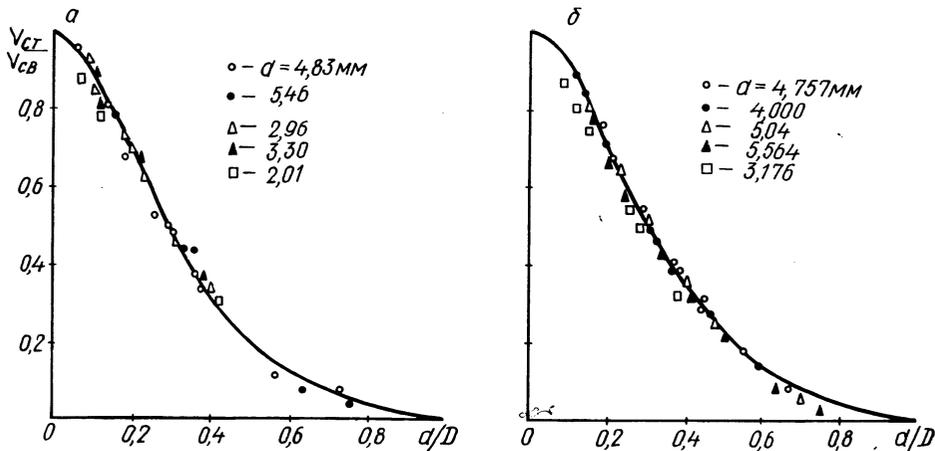


Рис. 3. Стесненное падение шаров в глицерине:

a — стеклянные, $\rho_1 = 2,98 \text{ г/см}^3$ ($\mu = 14,99 \text{ пуаз}$; $\rho = 1,258 \text{ г/см}^3$) при $n = 11,3$; b — стальные, $\rho_1 = 7,8 \text{ г/см}^3$ ($\mu = 9,45 \text{ пуаз}$; $\rho = 1,258 \text{ г/см}^3$) при $n = 10,9$.

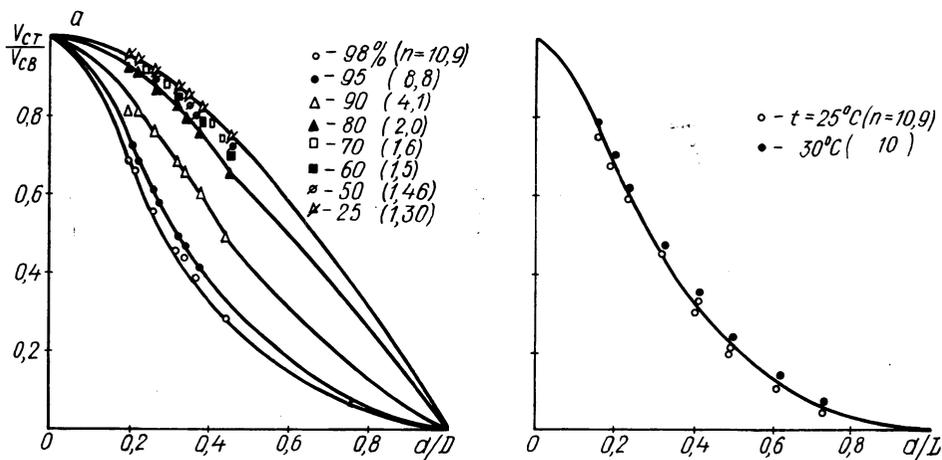


Рис. 4. Стесненное падение стальных ($\rho_1 = 7,8 \text{ г/см}^3$) и стеклянных ($\rho_1 = 2,98 \text{ г/см}^3$) шаров в глицерине и водных растворах глицерина различной концентрации (%): a — стальные шары в трубе 15 мм; b — стеклянный шар диаметром 5,2 мм в глицерине.

диаметром от 2 до 76 мм в стеклянных трубках диаметром от 15 до 106 мм, заполненных водой и глицерином при температуре 20°C ($\mu = 0,01 \text{ пуаз}$, $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$) (рис. 1).

Во второй серии опытов было изучено стесненное движение стальных шаров диаметром от 2 до 6,74 мм и стеклянных ($\rho_1 = 2,98 \text{ г/см}^3$) шаров диаметром от 2 до 4,83 мм в стеклянных трубках диаметром от 8 до 35 мм, заполненных глицерином марки «ЧДА» при температурах 20, 25 и 30°C ($\mu = 14,99$; 9,45 и 6,24 пуаз; $\rho = 1,258 \text{ г/см}^3$) (рис. 3, 4, б).

В третьей серии опытов исследовалось стесненное движение стальных шаров диаметром от 2 до 6,74 мм в стеклянной трубке диаметром 15 мм, заполненной водным раствором глицерина при температуре 20°C и концентрациями 100% ($\mu=14,99$ пуаз, $\rho=1,258$ г/см³), 98% ($\mu=9,71$ пуаз, $\rho=1,253$ г/см³), 95% ($\mu=5,45$ пуаз, $\rho=1,245$ г/см³), 90% ($\mu=2,34$ пуаз, $\rho=1,232$ г/см³), 80% ($\mu=0,62$ пуаз, $\rho=1,206$ г/см³), 70% ($\mu=0,229$ пуаз, $\rho=1,179$ г/см³), 60% ($\mu=0,1096$ пуаз, $\rho=1,151$ г/см³), 50% ($\mu=0,0605$ пуаз, $\rho=1,124$ г/см³), 25% ($\mu=0,02095$ пуаз, $\rho=1,058$ г/см³) (рис. 4, а).

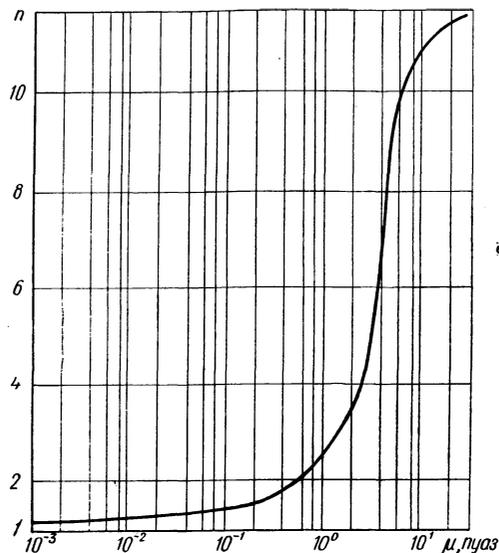


Рис. 5. Зависимость $n=f(\mu)$ при стесненном осаждении шаров.

В опытах время падения измерялось с точностью до 0,01 сек с помощью электрического секундомера, включенного в электрическую сеть фотоэлементами. Скорости свободного падения шаров определялись в трубе диаметром 1200 мм и длиной 3,5 м при изучении движения шаров в воде и в трубе диаметром 100 мм и длиной 1,5 м при движении шаров в глицерине.

Установлено, что формула (4) справедлива при движении шаров любой плотности в средах с различными физическими свойствами. Коэффициент n зависит только от вязкости среды (рис. 5).

Литература

1. Годен А. М. Основы обогащения полезных ископаемых. М., 1946.
2. Финкей И. Научные основы мокрого обогащения руд. Харьков, 1932.
3. Михайлов Т. М., Николаев А. М. Обобщенное уравнение осаждения сферических частиц. — «Химия и технология топлив и масел», 1963, № 6.
4. Fidleris V., Witmore R. Experimental determination of "the wall effect for spheres falling axially in cylindrical vessel, — Brit. Journ of Appl. Phys.", 1961, v. 12.
5. Розенбаум Р. Б., Тодес О. М., Исследование стесненного падения капли в вязкой жидкости. — «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1961, т. 37, № 3.
6. Куприн А. И., Глиняный Ю. В., Клешина Г. В. Исследования конечной скорости падения отдельных частиц угля и породы в вертикальных трубах, заполненных водой. — В сб.: Гидроаэромеханика. Вып. 5. Харьков, 1967.
7. Еркова Л. Н., Полюта Н. И. Свободное осаждение твердых сферических частиц в жидкой среде. — «Журн. прикладной химии», 1956, вып. 5, т. 24.
8. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидравлика газожидкостных систем. М., 1958.