УДК 622.75/. 77.001.11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПАДЕНИЯ ЧАСТИЦ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Смирнов В.А., канд. техн. наук, доц.
Донецкий национальный технический университет

Получены формулы для определения скорости свободного и стесненного падения сферических частиц в вязкой жидкости.

The formulas for definition of speed of free and humble dip of spherical fragments in thick liquid are obtained.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Знание закономерностей падения частиц в жидкости необходимо для создания теории гравитационных процессов и для расчета машин и аппаратов.

Анализ исследований и публикаций. В настоящее время существует множество формул различных авторов для определения скорости падения минеральных частиц [1] – [2], однако большинство из них дают лишь приближенное, по сравнению с действительным, значение скорости движения частицы. Кроме того, многие из формул дают удовлетворительные результаты лишь в некоторой определенной области чисел Рейнольдса.

Постановка задачи. Из приведенного выше анализа вытекает задача, состоящая в необходимости получения формулы для вычисления скорости падения частиц, которая была бы справедливой в широком диапазоне параметров, определяющих характер и скорость движения частицы.

Изложение материала и результаты. В соответствии с поставленной задачей были выполнены теоретические исследования, направленные на получение формулы для вычисления скорости установившегося движения сферической частицы в вязкой жидкости.

Наиболее универсальным методом определения скорости движения частицы в среде является метод П.В. Лященко, однако большим его недостатком является необходимость использования графической зависимости $Re = f\,(Re^2\psi)$. Поскольку зависимость построена в логарифмической системе координат (рис. 1), то ошибки при определении параметра Re неизбежны и, кроме того, значительны по абсолютной величине.

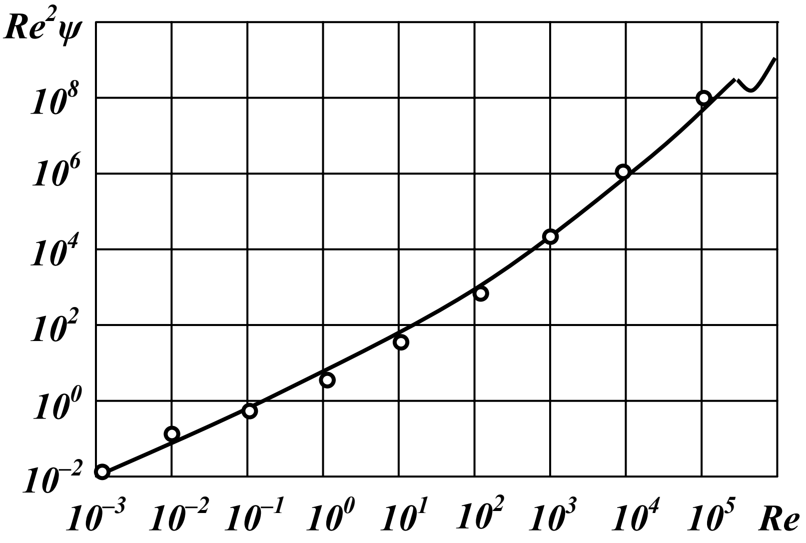

Рис. 1 – Зависимость параметра $Re^2\psi$ от параметра Re.

Сопротивление среды движущемуся в ней телу характеризуется безразмерным коэффициентом ψ. Для тела сферической формы получена эмпирическая зависимость $\psi = f(Re)$, которая хорошо аппроксимируется формулой [3]:

$$\psi = N / \mathrm{Re}^k . \quad (1)$$

Величины коэффициента N и показателя степени k в зависимости от области чисел Рейнольдса приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Величины коэффициента N и показателя степени k

Область Re	N	k	$\psi = N / \mathrm{Re}^k$
$0 \le Re \le 1$	24,00	1,00	$\psi = 24/Re$
$1 \le Re \le 50$	25,00	0,75	$\psi = 25/Re^{0,75}$
$50 \le Re \le 1000$	4,00	0,30	$\psi = 4/Re^{0,3}$
$1000 \le Re \le 200000$	0,45	0,00	$\psi = 0,45$

На рис. 2 зависимости $\psi = f(Re)$ нанесены точки, рассчитанные по формуле (1) при соответствующих N и k.

Однако использовать зависимость (1) в практических целях весьма затруднительно, поскольку для определения коэффициента гидродинамического сопротивления среды необходимо знать число Рейнольдса, что в свою очередь требует знания величины скорости движения частицы, а задача расчета как раз и состоит в определении скорости. В соответствии с предлагаемой методикой для определения скорости свободного падения сферического тела в вязкой среде, как и

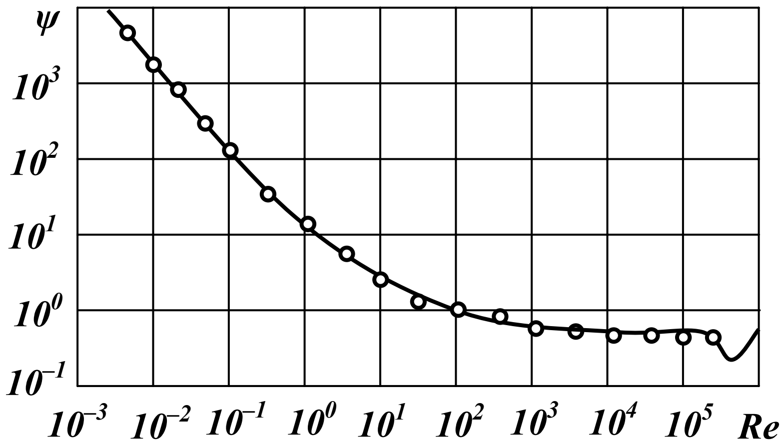

Рис. 2 – Зависимость коэффициента сопротивления ψ от параметра *Re*.

в классическом методе, рассчитывается безразмерный параметр Лященко *($Re^2\psi$)*:

$$\mathrm{Re}^2\psi = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \frac{(\delta - \Delta) g \Delta}{\mu^2}, \tag{2}$$

где d – диаметр сферического тела, м; δ – плотность тела, кг/м^3; Δ – плотность среды, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; ψ – коэффициент гидродинамического сопротивления среды движущемуся телу; μ – динамический коэффициент вязкости среды, Па • с.

С использованием безразмерного параметра Лященко *($Re^2\psi$)* рассчитывается число *Re* и по нему определяется скорость V движения частицы:

$$\mathrm{Re} = 10^{\frac{\lg \mathrm{Re}^2 \psi + 1{,}62}{0{,}883 + 0{,}047 g\, \mathrm{Re}^2 \psi} - 3{,}2}, \tag{3}$$

$$V = \mathrm{Re}\,\mu / d\Delta, \text{ м/с.} \tag{4}$$

Формула (3) хорошо аппроксимирует экспериментальную зависимость $Re = f\,(Re^2\psi)$; точки на рис. 1 – результаты расчета по формуле (3).

Также скорость свободного падения частицы можно, минуя промежуточные расчеты, определить непосредственно после вычисления параметра $Re^2\psi$:

$$V = 10^{\frac{\lg \mathrm{Re}^2 \psi + 1{,}62}{0{,}883 + 0{,}047 \lg \mathrm{Re}^2 \psi} - 3{,}2} \cdot (\mu / d\Delta), \text{ м/с.} \tag{5}$$

При движении массы частиц в ограниченном пространстве движение каждой частицы нарушается, прежде всего, вследствие изменения параметров среды – плотности и вязкости. Плотность и вязкость стесненной среды в основном определяются объемной концентрацией твердой фазы. Параметры стесненной среды (суспензии) в зависимости от объемной концентрации твердой фазы могут быть определены по формулам:

$$\Delta_c = \Delta + (\delta - \Delta)c, \text{ кг/м}^3, \tag{6}$$

$$\mu_c = \mu(1 + 2{,}5c + 7{,}35c^2 + 16{,}2c^3 + ...), \text{ Па·с}, \tag{7}$$

где Δ_c – плотность суспензии, кг/м^3; μ_c, μ - динамические коэффициенты вязкости суспензии и среды (воды), Па·с; c- объемная концентрация твердой фазы, доли ед.

Скорость движения частицы в стесненных условиях (при объемной концентрации твердой фазы до 40 %) может быть рассчитана по тем же формулам (2) – (5), но с использованием параметров стесненной среды (плотности и вязкости).

Выводы и направление дальнейших исследований. Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Выполнен анализ методов определения скорости движения твердой сферической частицы в вязкой среде.

2. Получено аналитическое выражение, хорошо аппроксимирующее зависимость $Re = f\,(Re^2\psi)$.

3. С использованием полученной зависимости $Re = f\,(Re^2\psi)$ предложена методика расчета скорости свободного и стесненного движения сферической частицы.

4. Предложенная методика расчета скорости движения частицы позволит исключить графическое определение параметра *Re*, вследствие чего значительно уменьшится погрешность определения скорости движения частицы.

5. Полученное выражение позволяет рассчитывать скорость свободного и стесненного движения частицы в широком диапазоне чисел Рейнольдса от 10^{-3} до 10^5.

Список источников.

1. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. - М.: Недра, 1979. - 295 с.
2. Благов И.С, Коткин А.М., Фоменко Т.Г. Гравитационные процессы обогащения. – М.: Горгостехиздат, 1962. – 232 с.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1969. – 744 с.
4. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа - М.: Физматиздат, 1967. – 368 с.

Дата поступления статьи в редакцию: 13.10.07