

## РОТАМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДОВ И СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ

Инж. КРАВЦОВ А. М.

*Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по  
новым направлениям развития техники, технологии и экономики*

Для измерений расходов, вязкостей и плотностей жидкостей предложено много конструкций приборов [1...4]. Около 10 % всех расходомеров представляют так называемые «расходомеры-ротаметры», в которых о величине расхода судят по положению взвешенного восходящим потоком воды или воздуха «поплавка» в конической трубке. Трудности применения таких расходомеров состоят в сложности конструкции и необходимости предварительно тарировать их. Эти трудности, на наш взгляд, могут быть сняты при применении в качестве ротаметра цилиндрической вертикальной или изогнутой по дуге трубки с чувствительным элементом в виде твердого, например стального, шарика. Если же при этом будет получено теоретическое решение задачи для случая обтекания потоком жидкости или газа чувствительного элемента, то с помощью такого ротаметра можно определять опытным путем любой параметр, входящий в расчетную формулу.

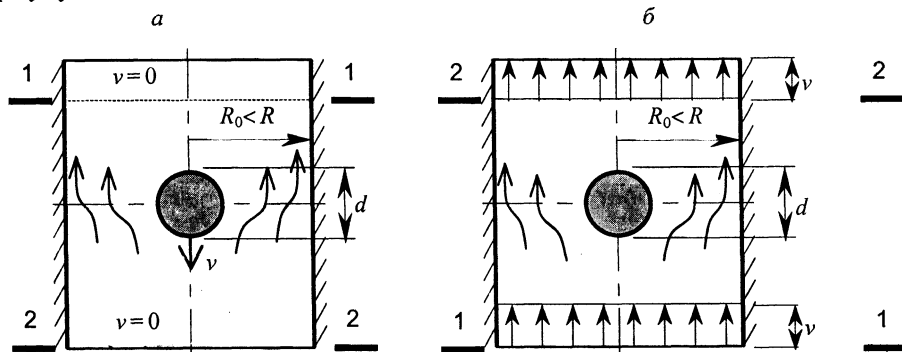


Рис. 1. Стесненное обтекание шара: а – при равномерном осаждении;  
б – при взвешивании равномерным восходящим потоком

Рассмотрим решение задачи о стесненном стенками равномерном осаждении или взвешивании равномерным восходящим потоком жидкости (обращенная задача) одиночных шаров в вертикальных цилиндрических трубках (рис. 1а, б). Стеснение стенками будет иметь место тогда, когда радиус трубки  $R_0$  меньше радиуса  $R$ , равного расстоянию, на котором влияние стенок на гидродинамические параметры исчезает.

Для решения задачи воспользуемся положениями теории подобия и анализа размерностей, которые гласят, что любое физическое явление или процесс зависят от ряда физических величин. В нашем случае

$$f(G_{эф}, \rho, \mu, v, d_{ш}, D) = 0, \quad (1)$$

где  $G_{\text{эф}} = 1/6 \pi d_{\text{ш}}^3 \Delta \rho g$  – эффективный вес шара в жидкости;  $\rho$  и  $\mu$  – плотность и динамический коэффициент вязкости жидкости;  $v$  – скорость равномерного движения;  $d_{\text{ш}}$  и  $D$  – диаметры шара и трубки;  $\Delta \rho$  – разность плотностей шара  $\rho_{\text{ш}}$  и жидкости  $\rho$ ;  $g$  – ускорение силы тяжести.

Принцип соотношения этих величин, известный как  $\pi$ -теорема, формулируется следующим образом: если для описания какого-нибудь физического явления необходимо  $n$  (в нашем случае  $n = 6$ ) величин и если эти величины влекут за собой  $m$  размерных категорий (при гидромеханических исследованиях  $m = 3$  (кг, м, с)), то соотношение может быть сведено к такому, которое содержит  $n-m$  безразмерных комплексов (критериев) и симплексов. В нашем случае

$$f(\text{Ar}, \text{Re}, d_{\text{ш}}/D) = 0, \quad (2)$$

где  $\text{Ar} = \frac{d_{\text{ш}}^3 \Delta \rho g}{\mu^2}$  – критерий Архимеда;  $\text{Re} = \frac{v d_{\text{ш}} \rho}{\mu}$  – критерий Рейнольдса;  $d_{\text{ш}}/D$  – симплекс диаметров, характеризующий условия стеснения.

Обработка результатов многочисленных исследований стесненного осаждения одиночных шаров в вертикальных цилиндрических трубках, приведенных в [5], дает следующую зависимость между безразмерными параметрами в (2)

$$\text{Re} = \frac{\frac{4}{3} \text{Ar} \left(1 - \frac{d_{\text{ш}}^2}{D^2}\right)}{\frac{a_0}{\left(1 - \frac{d_{\text{ш}}}{D}\right)^2} + b_0 \sqrt{\frac{4}{3} \text{Ar}}}, \quad (3)$$

где  $a_0$  и  $b_0$  – постоянные коэффициенты (в соответствии с обработкой опытных данных в [5]:  $a_0 = 20,6$ ;  $b_0 = 2/3$ ).

Формула (3) по сравнению с аналогичной в [5] более проста, получена иным путем с введением безразмерных критериев подобия, которые определяют соотношение действующих сил. Это позволяет более полно оценить влияние сил и раскрыть их физическую природу.

Результаты сопоставлений расчетных по (3) и опытных данных из [5] даны на рис. 2, 3.

При обтекании неподвижного одиночного шара в стесненных условиях в наклонных под углом  $\alpha$  и плавно изогнутых цилиндрических трубках расчетное уравнение получается, если в выражение для  $\text{Ar}$  добавить член, учитывающий трение покоя [6]. Тогда полученное нами уравнение (3) преобразуется к виду

$$\text{Re}_{\text{ш,ст}} = \frac{\frac{4}{3} \text{Ar}'_{\text{ш}} \left(1 - \frac{d_{\text{ш}}^2}{D^2}\right)}{\frac{a_0}{\left(1 - \frac{d_{\text{ш}}}{D}\right)^2} + b_0 \sqrt{\frac{4}{3} \text{Ar}'_{\text{ш}}}}, \quad (4)$$

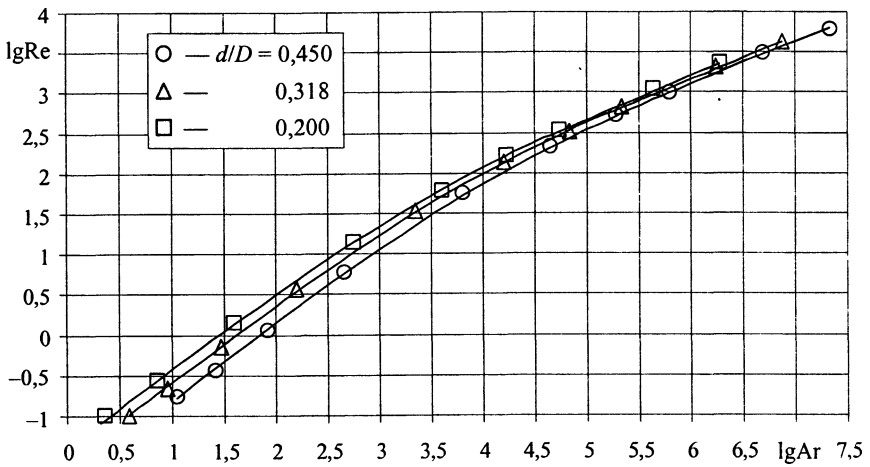


Рис. 2. Зависимость  $\lg Re = \lg f(Ar)$  при стесненном осаждении одиночных шаров в водно-глицериновых растворах и при постоянном  $d/D$ : линии – расчет по (3), точки – опыт [5]

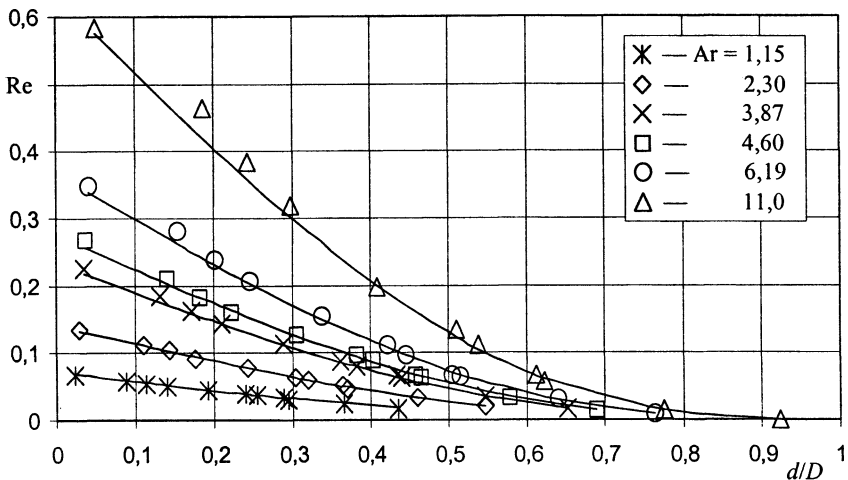


Рис. 3. Зависимость  $Re = f(d/D)$  при стесненном осаждении одиночных шаров в водно-глицериновых растворах и при постоянном  $Ar$ : линии – расчет по (3), точки – опыт [5]

где

$$Ar'_{ш} = Ar_{ш} \sin \alpha \left( 1 - 0,33 \sqrt{\frac{d_{ш}}{D}} \right)^2.$$

В (4)  $\alpha$  – угол наклона цилиндрической трубки к горизонтالي. Изогнутость трубки по дуге циклоиды дает плавное изменение угла наклона касательной в точке шара к горизонту с определением синуса угла через линейную координату  $h$ . Тогда  $\sin \alpha = \sqrt{h/D_{ш}}$  ( $D_{ш}$  – диаметр производящего циклоиду круга;  $h$  – высота положения точки касания шарика к стенке трубки относительно верхней плоскости).

Сопоставления расчетных по (4) и опытных данных [5] представлены на рис. 4.

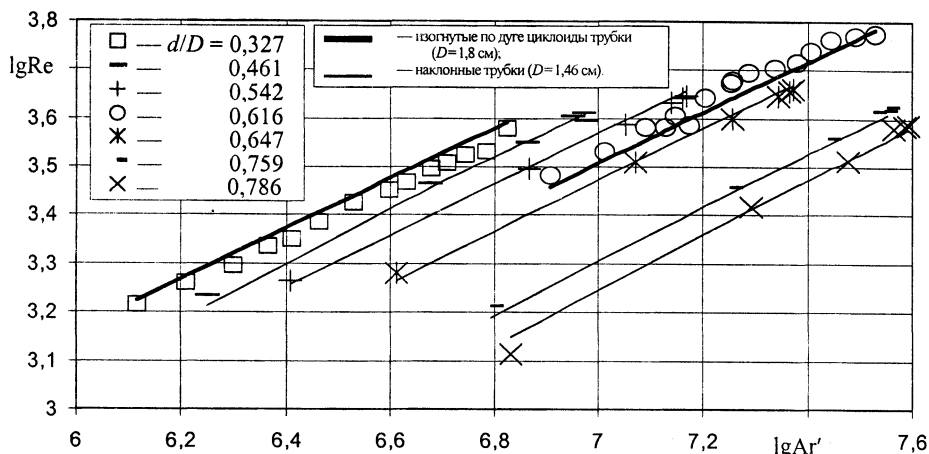


Рис. 4. Зависимость  $\lg Re = \lg f(Ar')$  при обтекании стальных ( $\rho_{ш} = 7800 \text{ кг/м}^3$ ) шаров в цилиндрических трубках с различными углами наклона к горизонту и в изогнутых по дуге циклоиды трубках: линии – расчет по (4), точки – опыт [5]

С использованием формул (3) и (4) экспериментальным путем можно найти значение любой величины, входящей в это уравнение: скорость  $v$  или расход  $Q$ , динамический коэффициент вязкости  $\mu$ , плотность среды  $\rho$  и т. д. Рассмотрим, например, расчеты расходомеров воздуха и воды, вискозиметров и плотномеров.

Принципиально расходомеры-ротаметры воды и воздуха могут быть выполнены в виде наклонной цилиндрической трубки (например, патент США № 1965333) или в виде трубки, изогнутой по дуге циклоиды [7].

Расчетное уравнение (4) при измерениях расходов после преобразования принимает вид

$$Q = \frac{Ar'_{ш} \frac{\pi D^2 \mu}{3 d_{ш} \rho} \left(1 - \frac{d_{ш}^2}{D^2}\right)}{\left(\frac{a_0}{1 - \frac{d_{ш}}{D}}\right)^2 + b_0 \sqrt{\frac{4}{3} Ar'_{ш}}} \quad (5)$$

При измерениях расходов воды и воздуха с помощью парциального расходомера, установленного в виде шунта, общий расход определяют суммой расходов в трубе  $Q_T$  и шунте  $Q$ . При этом  $Q_T = Q S_{ш} / S_T$  ( $S_{ш}$  – сопротивление в шунте;  $S_T$  – сопротивление в трубе между точками присоединения шунта).

Для измерения вязкости жидкостей предложен ряд вискозиметров-ротаметров с чувствительным элементом в виде шара. Известен [3] вискозиметр, состоящий из цилиндра с испытуемой жидкостью и твердого шарика, в котором используется формула Стокса для измерения динамического коэффициента вязкости жидкостей  $\mu$  по методу падающего шарика

для случаев медленного равномерного падения твердого шарика в объеме вязкой несжимаемой жидкости. С добавлением в формулу Стокса эмпирических поправок из-за влияния стенок и дна цилиндра расчетная формула имеет вид [3]

$$\mu = \frac{d_{\text{ш}}^2 (\rho_{\text{ш}} - \rho) g}{18 v_{\text{ш}} (1 + 2,104 d_{\text{ш}}/D)(1 + 3,1 d_{\text{ш}}/D)}. \quad (6)$$

Рекомендуемые соотношения:  $0,1 > d_{\text{ш}}/D \geq 0,004$ ;  $d_{\text{ш}}/L \leq 0,006$  ( $L$  и  $D$  – длина и диаметр цилиндра).

Скорости падения твердых шариков  $v_{\text{ш}}$  в этих случаях измеряются по времени их падения  $t$  на длине  $L$  между двумя фиксированными отметками створов на стенках цилиндра. При этом для исключения первоначального ускоренного участка движения первый створ намечается на расчетном удалении от места пуска твердого шарика.

Основными недостатками указанного расходомера являются: ограниченность применения вследствие того, что расчетная формула (6) справедлива лишь для медленных движений твердых шариков в сильновязких жидкостях. Пределы применения указанной формулы можно определить только через число Рейнольдса, в которое входит и искомое значение динамического коэффициента вязкости. Кроме того, в [5] показано, что формула Стокса – лишь результат асимптотического решения, т. е. расчетные значения по ней приближаются к истинным при стремлении чисел Рейнольдса к нулю. При применении вискозиметра трудно обеспечить условия свободного равномерного падения твердого шарика вследствие наличия ускоренного участка движения и стеснения движения стенками цилиндра, а прямолинейность траектории движения сильно нарушается. При измерениях требуются большие объемы жидкостей.

Известен также [3] вискозиметр Гепплера, состоящий из наклонной цилиндрической трубки с испытуемой жидкостью и твердого шарика. В нем твердый шарик катится под углом  $10^\circ$  по стенке наклонной цилиндрической трубки. При этом диаметр трубки ненамного превышает диаметр твердого шарика. Принцип работы вискозиметра основан на измерении времени движения твердого шарика в наклонной цилиндрической трубке от одной отметки до другой, расположенной на расстоянии 100 мм от нее. Относительные (по отношению к калибровочным жидкостям) значения динамического коэффициента вязкости определяются по формуле

$$\mu = K(\rho_{\text{ш}} - \rho)t, \quad (7)$$

где  $K$  – постоянная прибора,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $t$  – время перемещения шара на заданном участке, с.

Для определения постоянной  $K$  вискозиметр градуируют по жидкостям с известными вязкостями.

Недостатками данного вискозиметра являются: отсутствие теоретического обоснования расчетной формулы (7), необходимость проведения сложной и трудоемкой градуировки вискозиметра, необходимость определения плотности перед измерением ее вязкости одним из плотномеров [4], измерение лишь относительного (по отношению к калибровочным жидкостям), а не абсолютного значения динамического коэффициента вязкости.

Повысить точность измерений и упростить их, получить одновременно абсолютные значения динамического коэффициента вязкости и плотности всех без ограничения жидкостей и без предварительной градуировки прибора можно с использованием формулы (3) и простого по конструкции вискозиметра-плотномера [8]. Вязкость и плотность жидкости определяется по времени прохождения равномерно падающим шариком расстояния  $L$  между двумя отметками в вертикальной цилиндрической трубке.

При известной плотности жидкости  $\rho$  и шара  $\rho_{ш}$  после измерений промежутка времени  $t$  равномерного падения шара диаметром  $d_{ш}$  в вертикальной трубке диаметром  $D$  на расстоянии  $L$  динамический коэффициент вязкости определяют по формуле

$$\mu = At/L - B, \quad (8)$$

где

$$A = 0,0648 d_{ш}^2 (\rho_{ш} - \rho) g (1 - d_{ш}^2/D^2)(1 - d_{ш}/D)^2;$$

$$B = 0,0374 (1 - d_{ш}/D)^2 \sqrt{d_{ш}^3 (\rho_{ш} - \rho) \rho g}.$$

Предлагаемый вискозиметр-плотномер [8] позволяет определить одновременно динамический коэффициент вязкости и плотность жидкости. Для этого применяют две вертикальные цилиндрические трубки диаметрами  $D_1$  и  $D_2$ , в которых соответственно падают два шарика диаметрами  $d_1$  и  $d_2$ . При этом фиксируют времена их падения  $t_1$  и  $t_2$  на расстоянии  $L$ .

Если конструктивно принять  $d_1/D_1 = d_2/D_2$ , то для определения плотности жидкости при известной плотности шаров  $\rho_{ш}$  нужно составить систему из двух уравнений, подставляя в (8) известные и измеренные величины:  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $L$ ,  $g$ . Решение этой системы уравнений дает расчетную формулу в виде

$$\rho = \rho_{ш}/(1 + C^2), \quad (9)$$

где

$$C = \frac{\sqrt{d_1^3} - \sqrt{d_2^3}}{\sqrt{3g} (1 - d_1^2/D_1^2)(d_1^2 t_1/L - d_2^2 t_2/L)}.$$

После определения плотности жидкости  $\rho$  значение динамического коэффициента вязкости  $\mu$  находим по формуле (8).

## ВЫВОД

Полученные нами формулы (3) и (4) и предлагаемые конструкции ротаметров рекомендуется использовать для определения расходов и свойств жидкостей в различных отраслях народного хозяйства. В частности, такие приборы могут широко использоваться для управления технологическими процессами в системах водоснабжения, канализации и охраны водных ресурсов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лобачев П. В., Шевелев Ф. А. Расходомеры для систем водоснабжения и канализации. – М.: Стройиздат, 1976. – 304 с.
2. Каратаев Р. Н., Копырин М. А. Расходомеры постоянного перепада давления (ротаметры). – М.: Машиностроение, 1980. – 95 с.
3. Измерения массы, плотности и вязкости / В. Я. Кузьмин, С. И. Торопин, Ю. В. Тарбеев и др. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 167 с.
4. Кивилис С. С. Плотномеры. – М.: Энергия, 1980. – 279 с.
5. Кравцов М. В. Гидравлика зернистых материалов. – Мн.: Наука и техника, 1980. – 168 с.
6. Кравцов М. В. Гидромеханические процессы и сооружения гидроочистки. – Мн.: Ураджай, 1990. – 226 с.
7. Пат. 70 U BY, МКИ С 02 F 1/28. Расходомер воздуха / М. В. Кравцов, А. М. Кравцов. – № и 19990044; Заявл. 12.04.99; Опубл. 30.12.99 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 1999. – № 4. – С. 202.
8. Пат. 303 U BY, МКИ G 01 N 11/10. Вискозиметр-плотномер / М. В. Кравцов, А. М. Кравцов. – № и 19990118; Заявл. 04.11.99; Опубл. 30.09.01 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2001. – № 3. – С. 200.

Представлена Ученым советом

Поступила 10.06.2003