

Теория калибровки реометров

(Физико-химический институт им. Л. Я. Карпова)

В лабораторной практике для измерения расхода газа весьма часто применяется реометр. Описание устройства этого прибора и способов его калибровки можно найти во многих руководствах¹. Расход газа Q измеряется по возникающей вследствие трения разности давлений на концах капилляра, сквозь который протекает газ. Разность давлений определяется по высоте столба манометрической жидкости h . Обычно оказывается, что величина h не пропорциональна Q ; это показывает, что течение газа в капилляре имеет турбулентный (вихревой) характер.

При пользовании реометром часто возникает вопрос, как, имея данные калибровки для одного газа, вычислить показания реометра для другого газа. Например, если реометр предназначен для измерения расхода газа, сильно растворимого в воде, для калибровки нельзя пользоваться обычным лабораторным газовым счетчиком; значительно удобнее провести калибровку по воздуху с помощью газового счетчика, а затем пересчитать показания.

Решению этой задачи посвящена настоящая статья.

Мы пользуемся методом анализа размерностей². Представим себе набор реометров с капиллярами разного размера, но одинаковой формы. В этом случае размер капилляра может быть охарактеризован некоторой величиной l , например длиной.

Так как падение давления вдоль капилляра мало по сравнению с общим давлением, сжимаемостью газа можно пренебречь. Разность давлений будет определяться расходом газа, его вязкостью, плотностью и размером капилляра. Расход газа мы будем, как это обычно делается, выражать в объемных единицах, например, в литрах за 1 мин.

В таблице мы приводим переменные и их формулы размерности в системе с первичными

величинами длины L , массы M и времени T (например в системе CGS).

Таким образом мы имеем пять переменных и три основных единицы. Разность этих чисел равна двум, следовательно, должны существовать два независимых произведения без размерности. Мы можем выбрать следующие две величины, являющиеся безразмерными, как легко убедиться подстановкой формул размерностей $\frac{Q\rho}{l\eta}$ и $\frac{l^4\Delta p}{\rho Q^2}$. Так как всякая реальная зависимость может быть выражена в виде зависимости между безразмерными величинами, то должно иметь место уравнение.

$$\frac{l^4\Delta p}{\rho Q^2} = \varphi\left(\frac{Q\rho}{l\eta}\right), \quad (1)$$

где φ обозначает некоторую неизвестную функцию. Если мы рассматриваем течение различных газов в одном и том же капилляре, т. е. когда l постоянна, мы можем написать:

$$\frac{\Delta p}{\rho Q^2} = f\left(\frac{Q\rho}{\eta}\right). \quad (2)$$

Пусть мы имеем два газа, причем переменные для них имеют значения, обозначаемые индексами 1 и 2. Из уравнения (2) следует, что если

$$\frac{Q_1\rho_1}{\eta_1} = \frac{Q_2\rho_2}{\eta_2},$$

то

$$\frac{\Delta p_1}{\rho_1 Q_1^2} = \frac{\Delta p_2}{\rho_2 Q_2^2}.$$

Отсюда находим, что

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\rho_1\eta_2}{\rho_2\eta_1}$$

и

$$\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \frac{\rho_1\eta_2^2}{\rho_2\eta_1^2}.$$

Мы можем заменить отношение $\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1}$ отношением $\frac{h_2}{h_1}$ (h — величина поднятия манометрической жидкости), тогда получаем уравнения:

$$\left. \begin{aligned} Q_2 &= \frac{\rho_1\eta_2}{\rho_2\eta_1} Q_1; \\ h_2 &= \frac{\rho_1\eta_2^2}{\rho_2\eta_1^2} h_1. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

¹ Например Д у б и н и н, Физико-химические основы сорбционной техники, 2 изд. Ленинград 1935.

² См., например, Б р и д ж м е н, Анализ размерностей, 1934.

Эти уравнения решают вопрос о построении калибровочной кривой реометра для любого

газа, если известна эта кривая для одного газа, а также величины плотности и вязкости. Каждая точка кривой для первого газа с координатами Q_1 и h_1 дает точку кривой для второго газа с координатами Q_2 и h_2 , вычисляемыми по уравнению (3).

Изложенный способ не содержит никаких предположений о форме кривой, т. е. о виде зависимости h от Q . Опыт показывает, что эта зависимость весьма хорошо передается уравнением

$$h = cQ^n; \quad 1 \leq n < 2, \quad (4)$$

где c и n — постоянные, различные для разных реометров. В применимости уравнения (4) легче всего убедиться, строя график зависимости h от Q на логарифмической сетке; опытные точки ложатся на прямую.

Применимость уравнения (4) показывает, что зависимость, выражаемая уравнением (2), должна иметь следующий вид:

$$\frac{\Delta p}{\rho Q^2} = k' \left(\frac{Q\rho}{\eta} \right)^x,$$

k' и x — постоянные, не зависящие от природы газа. Отсюда:

$$\Delta p = k' Q^{2+x} \rho^{1+x} \eta^{-x}.$$

Сравнивая это уравнение с уравнением (4), находим, что $2+x=n$, т. е., что $x=n-2$. Поэтому

$$\Delta p = k' Q^n \rho^{n-1} \eta^{2-n}.$$

На основании пропорциональности Δp и h мы можем написать

$$h = k Q^n \rho^{n-1} \eta^{2-n}. \quad (5)$$

В этом уравнении постоянные k и n не зависят от природы газа.

Уравнение (5) показывает, что если для одного газа зависимость h от Q передается уравнением (4), то и для другого газа будет применимо уравнение (4), причем величина n сохраняет прежнее значение, а постоянная c_2 для второго газа может быть вычислена по постоянной c_1 для первого газа с помощью уравнения

$$c_2 = c_1 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{n-1} \left(\frac{\eta_2}{\eta_1} \right)^{2-n}. \quad (6)$$

При ламинарном (вязком) течении $n=1$ и $c_2 = c_1 \frac{\eta_2}{\eta_1}$ в согласии с законом Пуазейля.

Ризенфельд³ ограничился рассмотрением этого случая. К сожалению, Чмутов⁴, приводя способ расчета Ризенфельда, не оговаривает, как это делает Ризенфельд, что такой расчет верен лишь при условии пропорциональности

h и Q . Поэтому указания Чмутова могут привести к ошибкам.

Если пользоваться графиком на логарифмической сетке для изображения зависимости h от Q , то прямые для различных газов при одном и том же реометре должны быть параллельны, так как угловой коэффициент прямых определяется величиной n . Удобнее всего проводить калибровку по воздуху, например, с помощью газового счетчика, строить соответствующую прямую, затем, вычислив одну точку прямой для любого другого газа с помощью уравнения (3), строить параллельную прямую или, вычислив по тому же уравнению две точки, соединяя их прямой.

Опытная проверка изложенных выводов подтвердила их правильность. Рассмотрим еще случай, когда реометр применяется при давлении, отличающемся от того, при котором производилась калибровка. Так как вязкость газа не зависит от давления, а плотность его пропорциональна давлению, уравнение (5) решает вопрос о показаниях реометра. Пусть реометр откалиброван при атмосферном давлении, которое мы обозначим p_0 , а применяется при другом давлении p .

Объемный расход будем считать приведенным к давлению p_0 , что отметим индексом (Q_0), плотность при давлении p_0 обозначим ρ_0 . Так как

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \quad \text{и} \quad Q = Q_0 \frac{p_0}{p},$$

уравнение (5) дает

$$h = k \frac{p_0}{p} Q_0^n \rho_0^{n-1} \eta^{2-n}. \quad (7)$$

Это уравнение показывает, что если построен график для зависимости h от Q при атмосферном давлении p_0 , то им можно пользоваться при другом давлении p , помножая отсчитанную высоту манометрической жидкости на отношение $\frac{p}{p_0}$; тогда график дает непосредственно расход газа, приведенный к атмосферному давлению.

Следующий пример иллюстрирует способ расчета. Реометр, предназначенный для измерения расхода аммиака, был откалиброван по воздуху при 20° и атмосферном давлении с помощью лабораторного газового счетчика (капилляр диаметром 2 мм и длиной 50 мм, манометрическая жидкость — турбинное масло). Его показания для воздуха выражаются уравнением

$$h = 8,93 Q^{1,69};$$

расход Q выражен в литрах при нормальных условиях за 1 мин., h — в миллиметрах.

Вязкость воздуха при 20° равна $180,8 \cdot 10^{-6}$ пуаз, аммиака — $98,8 \cdot 10^{-6}$ пуаз. Отношение плотностей может быть заменено отношением молекулярных весов, причем для воздуха нужно принимать молекулярный вес 29,0.

³ Riesenfeld, Chem. Zeit., 51, 678, 1927.

⁴ Чмутов, Техника физико-химического исследования, ОНТИ, 1937.

Так как $8,93 \cdot \left(\frac{17,0}{29,0}\right)^{0,69} \cdot \left(\frac{98,8}{180,8}\right)^{0,31} = 5,12$, находим согласно уравнению (6), что для аммиака при 20° и атмосферном давлении показания должны выражаться уравнением:

$$h = 5,12 \cdot Q^{1,69}$$

Пусть требуется определить показание реометра при расходе аммиака 10 л/мин (при нормальных условиях) и давлении 1,5 ат. (при атмосферном давлении h было бы равно

$$5,12 \cdot 10^{1,69} = 251 \text{ мм, следовательно, при } 1,5 \text{ ат}$$

$$h = \frac{251}{1,5} = 167 \text{ мм.}$$

Аналогично можно рассмотреть вопрос о влиянии температуры на показания реометра. Строгое рассмотрение требует учета не только изменения ρ и η , но и плотности манометрической жидкости и расширения капилляра, т. е. изменения l , поэтому здесь нужно исходить из уравнения (1).

М. Калико

О методах измерения скоростей течения жидкостей

(Томский государственный университет)

При постановке и проведении многих исследований измерения скорости течения или другой цели приборы (анемометры, вертушки, трубки Прандтля и т. д.) требуют больших количеств жидкости и рассчитаны на измерения сравнительно больших скоростей. Для измерения же сравнительно малых скоростей (0,5—10 мл/мин) удовлетворительных методов до сих пор не предложено.

Сконструированный нами для этой цели прибор основан на принципе измерения скоростей по высоте бьющей струйки из конца узкого капилляра. Высота бьющей струи пропорциональна количеству выходящей жидкости, которое в свою очередь зависит от давления, производимого на эту жидкость. Устройство предлагаемого нами прибора несложно и достаточно ясно показано на рис. 1. (В дальнейшем для удобства мы этот прибор будем называть «фонтанчиком».) Он состоит из трубочки *a*, имеющей капиллярное отверстие (из которого во время действия фонтанчика бьет струйка жидкости), и трубки *b*, куда снизу с помощью куска каучуковой трубки вставляется капиллярная трубочка. В верхней части трубки *b* имеется отверстие, плотно закрываемое небольшой пробкой с. К нижней части трубки *b* припаивается, как показано на рис. 1, изогнутая трубка *d*, из которой выливается жидкость. Приготовление капилляра является наиболее ответственной частью сборки прибора. Для малых скоростей течения жидкостей порядка 0,01 мл/сек необходимо иметь капиллярное отверстие диаметром около 0,07—0,1 мм. Для приготовления его требуется некоторый навык. Мы готовили капилляры следующим образом: стеклянную трубочку диаметром 0,4—0,5 см и длиной 10—15 см вытягивали с одного конца примерно до диаметра в 2 мм, затем в узком месте разрезали. Узкий конец длинной части трубки оплавливали с таким расчетом, чтобы отверстие было едва заметным. В это узкое отверстие быстро вставляли заранее

приготовленную медную проволочку определенного сечения, которую затем осторожно заправляют. При этом приходится внимательно следить за тем, чтобы проволочка не припаялась криво и не сгорела на огне. Весьма важно, чтобы капиллярное отверстие трубочки было как можно короче. После оствания капилляра медную проволочку из стекла вытравляют азотной кислотой. Делают это таким образом: в наклоненную пробирку наливают до $\frac{1}{5}$ части крепкой азотной кислоты и опускают капиллярную трубочку, в свою очередь также наполненную кислотой. Пробирку слегка нагревают и оставляют стоять некоторое время. Через 15—20 мин., а иногда и скорее проволочка растворяется, и капилляр готов. Затем капилляр промывают водой и испытывают. Если полученный капилляр дает хорошую струйку воды высотой в 20—30 см в направлении длины трубочки при давлении жидкости, соответствующей разности уровней в 1 м, то та-

