

ПРИМЕНЕНИЕ КАПИЛЛЯРНЫХ РАСХОДОМЕРОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

В.Ф. Пелевин, А.Н. Прокапнев

Рассмотрены и проанализированы различные конструкции капиллярных расходомеров, применяемые в технологических измерениях, определены их достоинства и недостатки. Получены выражения, позволяющие определить погрешности данных расходомеров в зависимости от материала капилляров, точности определения их геометрических размеров, влияния температурных рабочих условий при эксплуатации, а также в зависимости от физико-химических свойств измеряемой жидкостной среды. Приведены формулы, позволяющие выбирать контрольно-измерительные приборы при работе с капиллярными расходомерами. Даны рекомендации, позволяющие уменьшить погрешности измерения расхода при использовании расходомеров данного типа.

Введение

Для измерения малых расходов чистых газов и жидкостей методом переменного перепада давления применяются расходомеры с гидравлическими сопротивлениями, выполненные в виде капиллярных трубок – капиллярные расходомеры [1]. Любое гидравлическое сопротивление, у которого известна зависимость потери давления от расхода, может быть преобразователем расхода. Большой частью в качестве такого сопротивления используются капиллярные трубки, работающие в ламинарном режиме и позволяющие получить линейную зависимость между объемным расходом Q и перепадом давления ΔP . Для измерения малого расхода жидкостей применяются различные преобразователи: вискозиметрические, манометрические и волю-манометрические. При ламинарном течении жидкости в капиллярной трубке напряжение сдвига жидкости изменяется по линейному закону, а скорость жидкости в поперечном сечении потока – по параболическому закону [2].

При правильном применении капиллярных преобразователей они обеспечивают сравнительно большой перепад давления, линейную (или близко к линейной) зависимость выходного сигнала от измеряемого расхода и хорошую воспроизводимость показаний. В качестве материала капиллярных трубок используются медные, латунные [3], керамические, стеклянные, стальные коррозионно-устойчивые трубки диаметрами от 0,25 мм до 0,62 мм и длиной до 90 м [1]. Капиллярные расходомеры позволяют измерять малые расходы с более высокой точностью, чем ротаметры, но требуют соблюдения чистоты и однофазности измеряемой среды [4], а также выполнения внутренней поверхности трубки с высоким классом чистоты [2]. В связи с этим их не рекомендуется использовать для измерения сред, в которых возможны отложения и осадки [5].

Большую погрешность в результаты измерения расхода вносит разница внутреннего диаметра капиллярной трубки между расчетным и реальным его значениями. Так, если фактический диаметр трубки не 0,25 мм, а на 5 % меньше, т.е. 0,2375 мм, то измеренный расход будет на 18,6 % меньше, чем расчетный [2,4]. Значительную погрешность вносит также большая величина реального перепада давления, вследствие нелинейности статической (градирующей) характеристики расходомера из-за дополнительной потери давления по длине капилляра [5]. Эта нелинейность возрастает с уменьшением длины капилляра и увеличением скорости потока [2].

Диапазон измерения капиллярного расходомера сильно зависит от диаметра капилляра, который не рекомендуется выбирать очень малым (менее 0,25 мм) из-за опасности засорения, а лучше увеличивать длину капилляра. Если длина капилляра получается очень большой, то его выполняют в виде спирали, что позволяет получить компактный расходомер. Однако при этом нарушается линейная связь между величиной расхода и перепа-

дом давления вследствие действия центробежной силы, которая резко увеличивает перепад давления по сравнению с прямым капилляром [6]. В спиральных капиллярах ламинарный режим работы сохраняется при числах Рейнольдса до $Re = 15000$ [1].

Капиллярные расходомеры могут измерять как очень малые расходы жидкости (до 1г/ч), так и значительные расходы (до 2000 кг/ч), за счет создания пучка одинаковых параллельных капилляров [6]. Многотрубные капиллярные расходомеры измеряют жидкость вязкостью 0,8–10 сПз и более в диапазоне расходов 0,6–2260 кг/ч. Их динамический диапазон 4:1 [4]. Например, для измерения расхода масла до 1000 кг/ч применяются капиллярные преобразователи, образующие пакет из 963 стальных трубок диаметром 0,48 мм и длиной 150 мм [2].

На практике используются прямые капилляры достаточного диаметра (4–16 мм) со стержнем внутри (диаметром от 3,6 до 15,4 мм соответственно), в которых измеряемое вещество движется по кольцевой щели толщиной от 0,1 до 0,5 мм. В этом случае обеспечивается линейная зависимость между расходом и перепадом давления за счет расположения отверстий для отбора давлений в пределах прямолинейного участка трубки [1]. Эти капиллярные расходомеры получили наибольшее применение для измерения малых расходов в химической промышленности. Они измеряют расход жидкости от 1 до 100 л/ч.

Известны также капиллярные преобразователи расхода винтового типа. В их основе – прецизионная винтовая пара с неполной (усечённой) ленточной, трапецеидальной или конусной резьбой. Их основное достоинство – возможность легкого перехода на различные пределы измерения путем регулирования винтовой части, находящейся в зацеплении [1]. Их недостаток такой же, что и у спиральных капиллярных расходомеров – отсутствие строгой пропорциональности между расходом и перепадом давления. К существенным недостаткам капиллярных расходомеров относится зависимость результатов измерения от изменения вязкости измеряемой среды от температуры, что требует для сохранения достаточной точности измерения помещать капилляр в термостат или автоматически вводить поправку на изменение вязкости с изменением температуры [6]. Их погрешность в термостате составляет меньше 0,5 %.

Если вязкость жидкости изменяется не только с температурой, но и с изменением ее состава или концентрации, то применяют компенсационный метод измерения. Через один капилляр пропускают жидкость, расход Q которой надо измерить, а через другой капилляр насосом объемного типа подают аналогичную жидкость с постоянным расходом Q_0 . Измеряемый расход Q вычисляют по [1]:

$$Q = Q_0 \frac{\Delta P}{\Delta P_0},$$

где ΔP и ΔP_0 – перепады давления на первом и втором капиллярах соответственно.

Капиллярные расходомеры находят применение в химической, пищевой, медицинской, нефтегазовой и парфюмерной промышленности. А также в хроматографии, в капиллярной дефектоскопии и в других направлениях. Класс точности капиллярных расходомеров 0,5;1. Они требуют индивидуальной градуировки вследствие трудности точного определения внутреннего диаметра капилляра, входящего в выражение для вычисления расхода в четвертой степени.

Капиллярные расходомеры не содержат движущихся частей, не требуют никаких средств регулирования и настройки, обеспечивают при проведении измерений высокую надежность и продолжительность работы в течение длительного времени и имеют низкую себестоимость, что обеспечивает их применение и в настоящее время в указанных областях промышленности [9].

Целью данной работы является исследование влияния материала, точности определения диаметра капилляра, а также температурных условий и физико-химических свойств измеряемой жидкости на погрешность капиллярных расходомеров.

Результаты исследований и их обсуждение

Известно, что потери давления в капиллярной трубке определяются вязкостным трением. Если входная точка отбора давления дифманометром на капиллярной трубке расположена от ее начала на расстоянии $l_1 = 0,06Re_d \cdot d$, а вторая точка отбора на расстоянии l_2 от входной, т.е. на ее входе образован параболический профиль скоростей измеряемой жидкой среды, то перепад давления на капилляре на участке $l = l_1 + l_2$ описывается законом Пуазейля [1]:

$$\Delta P_1 = \frac{128Q\mu l}{\pi d^4}, \quad (1)$$

где ΔP_1 – перепад давления на капилляре, Па;

Q – объемный расход, м³/с;

μ – динамическая вязкость измеряемой среды, Па·с;

l – длина капилляра, м;

d – диаметр капилляра, м.

Для получения линейной зависимости между расходом Q и перепадом давления ΔP_1 необходимо оба отверстия для отбора давления на капилляре делать в пределах участка l_2 .

Если измерить перепад давления ΔP на входе и выходе капиллярной трубки с учетом потери давления ΔP_2 , затрачиваемого на преобразование равномерного профиля скоростей на ее входе в параболической профиль скоростей, то получим [1]:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2, \quad (2)$$

$$\Delta P_2 = \frac{16\zeta\rho Q^2}{\pi^2 d^4}, \quad (3)$$

где ΔP_2 – потеря давления на входе капиллярной трубки [7], Па;

ζ – коэффициент потерь ($\zeta=0,8$ при остром входе капилляра и $\zeta=1,12$ при закругленном входе в капилляр);

ρ – плотность измеряемой среды, кг/м³.

Подставим выражение (1) и (3) в формулу (2), получим:

$$\Delta P = \frac{128Q\mu l}{\pi d^4} + \frac{16\zeta\rho Q^2}{\pi^2 d^4}. \quad (4)$$

Запишем выражение (4) в виде квадратного уравнения относительно величины расхода Q :

$$K_1 Q^2 + K_2 Q - \Delta P = 0, \quad (5)$$

где $K_1 = \frac{16\zeta\rho}{\pi^2 d^4}$, $K_2 = \frac{128\mu l}{\pi d^4}$.

Решая уравнение (5) и производя преобразования, получим выражение для определения величины расхода при измерении перепада давления на входе и выходе капилляра

$$Q_1 = \frac{4\pi\mu l}{\zeta\rho} \left(\sqrt{1 + \frac{\zeta\rho d^4 \Delta P}{256\mu^2 l^2}} - 1 \right). \quad (6)$$

Разлагая подкоренное выражение в ряд Тейлора и ограничиваясь первыми тремя членами, получим

$$Q_1 = \frac{\pi d^4 \Delta P}{128 \mu l} \left(1 - \frac{\zeta \rho d^4 \Delta P}{1,024 \cdot 10^3 \mu^2 l^2} \right). \quad (7)$$

Здесь выражение в круглых скобках дает поправку на формулу Пуазейля в этом случае. Так как расчет расхода по формуле Пуазейля, согласно выражению [1] имеет вид

$$Q = \frac{\pi d^4 \Delta P}{128 \mu l}, \quad (8)$$

то измерение расхода при подключении дифманометра на входе и выходе капилляра дает, исходя из выражения (7), относительную погрешность

$$\delta Q_1 = \frac{Q - Q_1}{Q} \cdot 100\% = \frac{\zeta \rho d^4 \Delta P}{10,24 \mu^2 l^2}. \quad (9)$$

Как сказано выше, на результаты измерения расхода капиллярными расходомерами существенное влияние оказывает изменение температуры в процессе эксперимента. Причем влияние это двоякое: как на само средство измерения – капилляр (изменение его геометрических размеров вследствие линейного теплового расширения материала капилляра), так и на измеряемую среду (изменение ее физико-химических характеристик – вязкости, плотности).

В этом случае при расчете по формуле (8) Пуазейля необходимо учитывать, что при изменении рабочей температуры t изменяются геометрические размеры капилляра

$$d_t = d(1 + \alpha t), \quad l_t = l(1 + \alpha t), \quad (10)$$

где α – коэффициент линейного расширения материала капилляра; а также изменяется и коэффициент динамической вязкости измеряемой среды μ_t , вследствие чего получим

$$Q_t = \frac{\pi d^4 (1 + \alpha t)^4 \Delta P}{128 \mu_t l (1 + \alpha t)}. \quad (11)$$

Относительная погрешность влияния температуры на величину измеряемого расхода при отсутствии термостабилизации капиллярного расходомера в зависимости от материала составит

$$\delta Q_t = \frac{Q - Q_t}{Q} \cdot 100 = \left[1 - \frac{\mu(1 + \alpha t)^3}{\mu_t} \right] \cdot 100. \quad (12)$$

На рисунке 1 приведены зависимости относительной погрешности измерения расхода воды, керосина и метилового спирта от температуры для капилляров, изготовленных из меди с коэффициентом линейного расширения $\alpha = 16,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, стали с $\alpha = 13,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и тугоплавкого стекла с $\alpha = 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Как видно из рисунка 1, зависимость относительной погрешности капиллярных расходомеров, изготовленных из различных материалов, от температуры практически не зависит от материала – кривые зависимости совпадают, вследствие малых значений коэффициентов линейного расширения и незначительного изменения геометрических размеров капилляров в данном диапазоне температур.

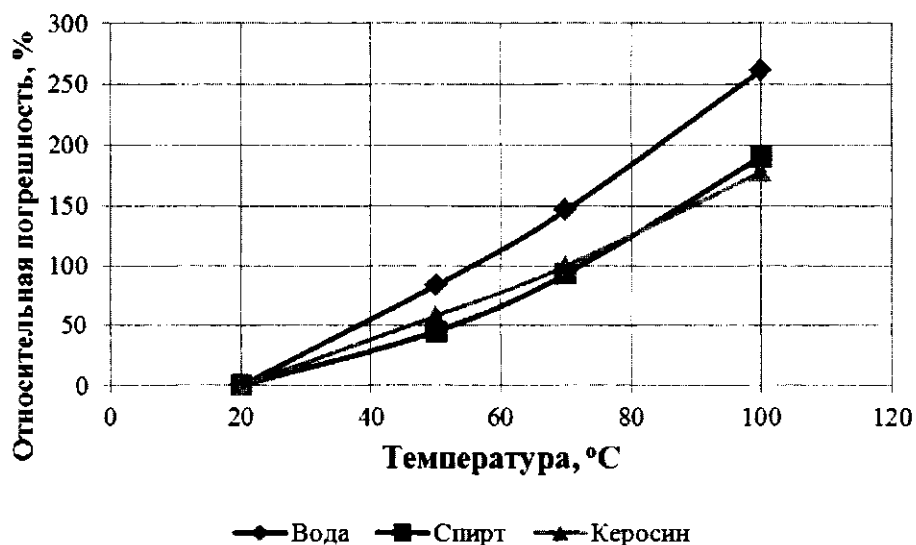


Рисунок 1 – Зависимость относительной погрешности измерения расхода различных жидкостей капиллярными расходомерами, изготовленными из меди, стали и тугоплавкого стекла, от температуры

Значительный рост погрешности измерения расхода вызывает существенное изменение динамической вязкости измеряемой жидкости от температуры, что определяется ее физико-химическими свойствами и требует в зависимости от этого различного уровня температурной стабилизации.

Так как коэффициент динамической вязкости отличается от коэффициента кинематической вязкости на величину, равную плотности жидкости, то отношение коэффициентов динамической (12) и кинематической вязкостей будет одинаковым при одной и той же температуре. Значения коэффициентов кинематической вязкости рассмотренных жидкостей при различных значениях температуры приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов динамической вязкости при различных значениях температуры, $10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ [10]

Температура, °C	20	50	70	100
Керосин	1,5	0,95	0,75	0,54
Вода	1,01	0,55	0,41	0,28
Спирт метиловый	0,58	0,4	0,3	0,2

Неточное знание размера внутреннего диаметра d капилляра или его изменение из-за теплового расширения в процессе измерения расхода будет давать погрешность в определении расхода вследствие отличия размера, заложенного в расчетной формуле (8) от истинного значения на величину Δd . Учтем это при выводе формулы Пуазейля [8].

Пусть $d = 2R$, где R – радиус капилляра, который отличается от расчетного значения на величину ΔR вследствие указанных причин. Из условия несжимаемости жидкости следует, что ее скорость течения v будет постоянной вдоль всего капилляра, но может изменяться по мере удаления от оси трубы, т.е. $v = f(r)$, где r – расстояние от оси капилляра. Учитывая разность давлений ΔP на входе и выходе капилляра длиной l , определим расход жидкости, интегрируя изменение расстояния r , в диапазоне изменения радиуса трубы $R + \Delta R$:

$$Q_2 = \frac{\pi \Delta P}{2\mu l} \int_0^{R+\Delta R} (R^2 - r^2) r dr - K \int_0^{R+\Delta R} (R^2 - r^2) r dr, \quad (13)$$

где $K = \frac{\pi \Delta P}{2\mu l}$.

Проведя интегрирование получим

$$Q_2 = K \frac{R^2}{2} (R + \Delta R)^2 - \frac{K}{4} (R + \Delta R)^4. \quad (14)$$

После преобразования выражение (14) можно представить в общем случае в виде

$$Q_2 = K \left[\frac{R^4}{4} - \Delta R^2 \left(R + \frac{\Delta R}{R} \right)^2 \right], \quad (15)$$

которое при $\Delta R = 0$ переходит в формулу Пуазейля (8).

Считая, что $\delta = \frac{\Delta R}{R}$ в долях является относительной погрешностью определения радиуса R капилляра, то, подставляя значение коэффициента K , получим

$$Q_2 = \frac{\pi \Delta P R^4}{2\mu l} \left[\frac{1}{4} - \delta^2 \left(1 + \frac{\delta}{2} \right)^2 \right] \quad (16)$$

или

$$Q_2 = Q \left[1 - 4\delta^2 \left(1 + \frac{\delta}{2} \right)^2 \right]. \quad (17)$$

В этом случае относительную погрешность определения расхода можно определить из графика, представленного на рисунке 2, рассчитанную по формуле

$$\delta Q_2 = \frac{Q - Q_2}{Q} \cdot 100\% = 4\delta^2 \left(1 + \frac{\delta}{2} \right)^2 \cdot 100\%. \quad (18)$$



Рисунок 2 – Влияние относительной погрешности определения радиуса капилляра $\pm\delta$ на величину относительной погрешности определения расхода δQ_2

Из данных рисунка 2 следует, что относительная погрешность определения расхода δQ_2 в зависимости от допускаемой величины поля разброса $\pm\delta$ относительной погрешно-

сти радиуса капилляра от расчетного увеличивается и может составлять несколько процентов.

Для получения ламинарного режима и линейной зависимости между расходом Q и перепадом давления ΔP длину капилляра l желательно выбирать из соотношения $l/d = 100 \div 300$ [1].

Диаметр капиллярных трубок при числах Рейнольдса $Re \leq 2300$ в расходомерах определяется из уравнения [1]:

$$d \leq 0,554 Q_{max} / \nu, \quad (19)$$

где Q_{max} – максимальная величина измеряемого объемного расхода, м³/с;

ν – коэффициент кинематической вязкости измеряемой среды, м²/с;

d – длина капиллярной трубки, мм.

Подставим в выражение (19) величину измеряемого максимального расхода согласно выражения (8), и учитывая, что $\nu = \mu/\rho$ получим

$$d < 0,554 \frac{\pi d^4 \Delta P_{max} \rho}{128 \mu^2 l},$$

или

$$\Delta P_{max} \geq 73,58 \frac{\mu^2 l}{\rho d^3}. \quad (20)$$

Выражение (20) позволяет оценить для данного капиллярного расходомера диапазон измеряемого перепада давления рабочего дифманометра в зависимости от физико-химических параметров жидкости.

Заключение

Рассмотрены различные конструкции капиллярных расходомеров, определены их достоинства и недостатки. Получена поправка на формулу Пуазейля в зависимости от места подключения дифманометра на капилляре и оценена даваемая ею погрешность измерения расхода. Рассмотрены погрешности, возникающие вследствие влияния температуры на результаты измерения, позволяющие выбрать оптимальный режим стабилизации температуры в зависимости от вязкости измеряемой жидкости. Оценено влияние неточного знания внутреннего диаметра капилляра на погрешность измерения. Приведены выражения, позволяющие выбрать предельный перепад давления дифманометра для проведения измерения расхода капиллярным расходомером жидкостной среды с данными физико-химическими свойствами.

Литература

- 1 Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Справочник. т.1. – СПб.: Политехника, 2002.– 410с.
- 2 Френкель, Б.А. Автоматизация экспериментальных установок. – М.:Химия, 1980.– 250 с.
- 3 ГОСТ 2624-77. Трубки медные и латунные капиллярные
- 4 www.ru-auto.info/term6986.
- 5 www.ngpedia.ru/id380717p.2.html. Большая химическая энциклопедия
- 6 Фарзана, Н.Г.. Технологические измерения и приборы. – М.: Высшая школа. – 1989. – 456 с.
- 7 Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества.– Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
- 8 http://files.lib.sfu-kras.ru/ebib/umkd/u_course/Lekc/Part2/Glava6/6.10.htm
- 9 ГОСТ 15528-86. Средства измерения расхода, объема и массы протекающих жидкостей и газов. Термины и определения.
- 10 <http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/ViscosityReynolds/GuidePhysicsViscosity/>

Поступила в редакцию 24.12.2014