**Изучить лекцию, ответить на контрольные вопросы, ответы скинуть мне на почту**

**ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ**

Расход – это физическая величина, определяемая количеством жидкости или газа, проходящих через трубу или русло в единицу времени. Различают объемный расход ***Q***, когда количество измеряется в объемных единицах, и массовый ***М***, когда расход измеряется в единицах массы. Расход связан со средой по сечению потока скоростью v его сечения ***S*** известным соотношением:

https://helpiks.org/helpiksorg/baza7/673126955733.files/image002.gif

где ***ρ*** – плотность среды.

Наиболее распространенным в лабораторных условиях методом измерения расхода жидкости в трубах является его **измерение по перепаду давления на суживающемся устройстве** (рис. 16.1).

|  |
| --- |
|  |
|  | https://helpiks.org/helpiksorg/baza7/673126955733.files/image007.gif |

Данное устройство нуждается в тарировке, хотя промышленностью выпускаются мерные шайбы с отверстием, для которых имеются готовые таблицы для определения расхода воды по показаниям дифференциального манометра.

Тарировка таких устройств, обычно, производится по эталонам или мерным способом, который также часто используется и непосредственно для измерения расхода жидкости, когда жидкость можно вывести из системы в накопитель со свободной поверхностью.

При использовании **мерного способа** для измерения количества жидкости используются либо специальные мерные емкости, - объемный расход, - либо достаточно точные весы любого типа – массовый расход (в настоящее время, обычно, для измерения массового расхода применяются тензометрические весы).

Мерный способ очень точен, однако его применение весьма ограничено, т.к. он практически не позволяет производить постоянный во времени контроль над расходом.

При измерении расхода жидкости по перепаду давления на суживающемся устройстве, в качестве последних используют нормальные диафрагмы, нормальные сопла и трубы Вентури (рис. 16.2).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | https://helpiks.org/helpiksorg/baza7/673126955733.files/image010.gif |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | |  |  |  | | --- | --- | --- | | Нормальная диафрагма | Нормальное сопло | Труба Вентури | |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | |  | | --- | | Рис. 16.2. Виды суживающихся устройств | |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

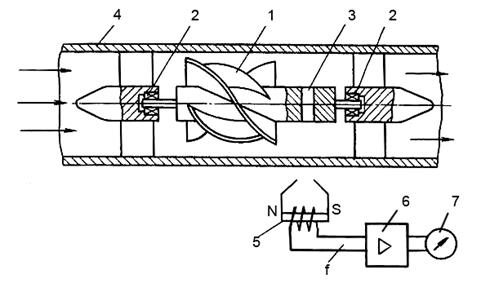
Достоинством расходомеров с суживающимися устройствами является их простота, возможность измерения расходов не только однофазных, но и некоторых двухфазных сред. Их используют при любом диаметре и любых скоростях и давлениях. Имеются стандартные методики для расчета профиля таких измерителей.

Основной недостаток таких расходомеров является нелинейная функция преобразования перепада давления от расхода, малое отношение максимального и минимального измеряемого расхода (оно равно трем) и трудностями измерения пульсирующего и переменного расхода. Основная приведенная погрешность таких расходомеров составляет 1-3%.

При достаточно большой скорости потока этими расходомерами можно измерять и расходы газа, однако при этом нужно использовать сравнительно чувствительные дифференциальные манометры.

Расход жидкости и газа в трубах (с большей точностью – расход жидкостей) может быть измерен с помощью **турбинных расходомеров**. Устройство датчика приведено на рис. 16.3. Датчик представляет собой турбинку 1, ось которой, изготовленная из немагнитного материала, укреплена в подшипниках 2. В оси запрессован стальной стержень 3. Турбинка установлена в трубе 4, изготовленной из немагнитного материала. Снаружи трубы смонтирован импульсный индукционный преобразователь 5.

При поступательном движении жидкости или газа по трубе турбинка вращается. Если трение в подшипниках пренебрежимо мало, то частота вращения такова, что среда проходит между лопастями турбинки поступательно, без вращения вокруг оси турбинки. Частота вращения турбинки пропорциональна скорости движения среды. Вращение стального стержня в поле постоянного магнита индукционного преобразователя генерирует в катушке импульсы напряжения. Их частота ***f*** пропорциональна частоте вращения турбинки и, следовательно, расходу среды. Вторичным преобразователем 7 является частотомер, проградуированный в единицах расхода.



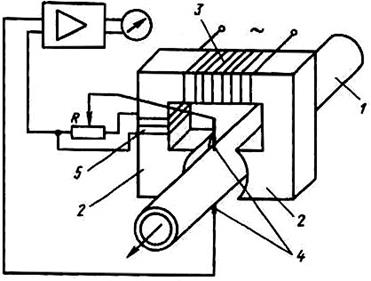
|  |
| --- |
|  |
|  | |  | | --- | | Рис. 16.3. Расходомер турбинного типа: 1. Турбинка. 2. Подшипники. 3. Стальной стержень. 4. Труба. 5. Индукционный преобразователь. 6. Усилитель. 7. Частотомер | |

 Турбинные расходомеры применяются для измерения расхода чистых жидкостей и газов. Твердые примеси ухудшают качество подшипников, увеличивают трение и погрешность расходомера. Расходомер требует индивидуальной градуировки, поскольку его градуировка справедлива, лишь для одного распределения скоростей среды по сечению трубы. При постановке турбинки в трубу другого диаметра распределение скоростей будет иным и градуировка изменится. Погрешность турбинных расходомеров обычно имеет порядок 0,3‑1,5%, хотя имеются приборы с погрешностью 0,1 %. Расходомеры этого типа могут иметь постоянную времени до 1—50 мс. Их можно применять для измерения расхода переменных и пульсирующих потоков.

Аналогичные преобразователи служат для измерения скорости потока жидкости в различных точках сечения канала или русла реки. Они могут также использоваться для измерения скорости судна относительно воды.

Для измерения расхода воды и других электропроводных жидкостей могут использоваться **индукционные расходомеры**, устройство которых показано на рис. 16.4. Жидкость, расход которой измеряется, протекает по трубе 1, изготовленной из электроизоляционного материала. Труба находится между полюсами магнитной системы 2. Магнитный поток возбуждается переменным током промышленной частоты в обмотке 3. Через трубу проходят два диаметрально расположенные электрода 4, касающиеся жидкости. При ее протекании между электродами появляется ЭДС.

Можно считать, что в течение некоторого малого интервала времени ***Δt*** магнитная индукция ***В*** в жидкости между полюсами остается постоянной. Электроды, жидкость между ними и измерительная цепь образуют замкнутый контур, причем один его проводник (жидкость) перемещается в магнитном поле. При его перемещении со скоростью ***v*** в контуре, имеющем один виток (***w*** = 1), согласно закону электромагнитной индукции индуцируется ЭДС.



|  |
| --- |
|  |
|  | |  | | --- | | Рис. 16.3. Расходомер турбинного типа: 1. Труба. 2. Магнитная система. 3. Обмотка возбуждения. 4. Электроды. 5. Дополнительная обмотка | |

Генерируемая ЭДС имеет порядок нескольких милливольт и соизмерима с ЭДС, трансформируемой в измерительный контур непосредственно с обмотки возбуждения. Для компенсации последней служит дополнительная обмотка 5 и переменный резистор ***R***. В обмотке трансформируется ЭДС, и часть ее подается в измерительный контур в противофазе с паразитной ЭДС. С помощью резистора ***R*** величина компенсирующей ЭДС подбирается равной паразитной ЭДС и компенсирует ее.

Индукционные расходомеры пригодны для измерения расхода вязких, агрессивных и сильно загрязненных жидкостей (пульп), удельное сопротивление которых не должно превышать 103 — 105 Ом/м. Эти расходомеры безынерционны и могут служить для измерения расхода быстропеременных и пульсирующих потоков. Например, индукционные расходомеры типа ИР-1М имеют диаметр условного проходного отверстия от 10 до 80 мм. Верхние пределы измерения – от 0,32 до 160 м3/ч. Основная погрешность 1 —1,6 %.

В **электронно-механических измерителях расхода турбинного типа** (рис. 16.4) считывающим элементом является оптоэлектронная пара – светодиод инфракрасного излучения 6 и фоторезистор 5.

Чем быстрее движется жидкость или газ по трубопроводу 1 (чем больше его расход), тем быстрее вращается турбинное колесо 2, на одной оси с которым закреплен диск 3 со сквозными пазами.

Фоторезистор 5 и светодиод 6 установлены напротив друг друга и разделены диском 3 таким образом, что при вращении диска 3 поток излучения от светодиода 6 попадает на фоторезистор 5, когда сквозной паз оказывается между ними.

|  |
| --- |
|  |
|  | https://helpiks.org/helpiksorg/baza7/673126955733.files/image019.gif |

В этом случае сопротивление фоторезистора скачком изменяется, и в электрической цепи, в которую он включен, появляется импульс напряжения.

В дальнейшем эти импульсы складываются микропроцессором в течение одной секунды, а их сумма делится на количество сквозных пазов на диске 3. Так высчитывается частота вращения турбинного колеса 2, пропорциональная расходу жидкости или газа. Этим измерителем можно контролировать и потоки с изменяющимся расходом. Постоянная времени этого преобразователя целиком зависит от размеров и массу турбинного колеса – чем они меньше, тем меньше время, необходимое для перестройки прибора на новый расход.

Вместо электронного на оси турбинного колеса может устанавливаться механический счетчик количества оборотов, деления которого градуируются в литрах и долях литров подобно автомобильному спидометру. В этом случае для определения расхода, так же как и при мерном способе нужно контролировать время процесса.

Существуют **тепловые измерители расхода жидкости**, в которых измерительный преобразователь (датчик) представляет собой четыре терморезистора (сопротивления, реагирующего на температуру), соединенные в мостовую схему (измерительный мост) для повышения чувствительности и размещенные по периферии трубопровода на тонкой квадратной подложке (рис. 16.5). Поток жидкости омывает терморезисторы и в большей степени охлаждает те из них, которые установлены перпендикулярно потоку.

В том случае, если **R1=R3=R2=R4,**ток рассогласования ***IP*** = 0.

При охлаждении потоком топлива сопротивление терморезисторов изменяется, и чем выше скорость потока, тем больше разность в изменении сопротивлений терморезисторов, установленных вдоль (**R1, R3**) и поперек (**R2, R4**) потока. В этом случае измерительный мост оказывается разбалансированным, и в его диагонали возникает ток разбалансировки ***IP***, который тем больше, чем выше скорость потока.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  | https://helpiks.org/helpiksorg/baza7/673126955733.files/image022.gif |  |  |
|  |  |  |  |
|  | |  | | --- | | Рис. 16.5. Конструктивная (а) и электрическая принципиальная (б) схемы резистивного расходомера топлива: 1. Труба. 2. Изолятор. 3. Тонкая керамическая пластина. 4. Резистивный слой. 5. Электрические выводы. R1 - R4 – резисторы. U– питающее напряжение. IP – ток рассогласования. МП – микропроцессор системы управления | |  |  |

Этот ток является сигналом датчика и поступает на обработку в микропроцессор **МП**, анализирующий информацию и производящий пересчет тока рассогласования в расход. Этот же микропроцессор управляет величиной напряжения, подводимого к мосту для корректировки его работы.

Для оперативного измерения текущего расхода газа и жидкости с относительно невысокой точностью (в пределах 5%) широко используются **ротаметры**, представляющие собой прозрачные стеклянные проградуированные трубки переменного сечения по длине (рис. 16.6).

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  | https://helpiks.org/helpiksorg/baza7/673126955733.files/image023.gif |  |  |
|  |  | |  | | --- | | Рис. 16.6. Схема работы ротаметра: 1. Стеклянная коническая трубка с делениями. 2. Поплавок | |  |
|  |  |  |  |

Поплавок имеет специально спрофилированную форму, позволяющую ему удерживаться в вертикальном положении в потоке среды (газа или жидкости). Положение поплавка зависит от скорости движения среды (расхода), и он находится во взвешенном состоянии под действием суммы сил – веса поплавка и давления потока среды. Чем больше скорость потока (чем больше расход), тем более высокое положение должен занять поплавок, чтобы пропустить поток среды в зазоре между ним и стенками конической трубки. Отсчет ведется визуально по верхнему торцу поплавка. Ротаметры тарируются по эталонам, газовым счетчикам или мерным способом (последнее - для жидкости).

Преимуществом ротаметров является простота использования, высокая надежность, оперативность получения результата.

Недостатки – невозможность использования при значительных давлениях (ротаметры обычно подключают на выходе из системы), малый диапазон измерения. В связи с последней особенностью при измерениях в большом диапазоне используют одновременно несколько ротаметров, подключенных параллельно (рис. 16.7).

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  | https://helpiks.org/helpiksorg/baza7/673126955733.files/image024.gif |  |  |
|  |  | |  | | --- | | Рис. 16.17. Схема подключения батареи ротаметров для измерения расхода в большом диапазоне | |  |
|  |  |  |  |

Свойство движущегося потока оказывать давление на препятствие использовано в датчиках расхода газов, одна из конструкции которых показана на рис. 16.8.

В **измерителе расхода**, представленном на рис. 16.8, воздушный поток действует на измерительную заслонку 2, закрепленную на оси в специально спрофилированном канале.

Поворот ползуна 12 производится измерительной заслонкой 2 (у них общая ось вращения), и далее с помощью резистивного слоя 5 преобразуется в напряжение, пропорциональное расходу воздуха. Зачастую потенциометр представляет собой ползун 9, перемещающийся по прерывистой контактной дорожке, к которой припаяна цепочка резисторов.

Воздействие воздушного потока на заслонку 2, имеющую прямоугольную форму, уравновешивается пружиной 8. Пластина демпфера 4, неподвижно соединенная с измерительной заслонкой 2, при повороте последней сжимает или расширяет воздух, находящийся в демпферной камере 3. При этом воздух из камеры 3 протекает через зазоры между пластиной 4 и стенками камеры 3, чем достигается сглаживание колебаний, вызванных пульсацией воздушного потока.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  | https://helpiks.org/helpiksorg/baza7/673126955733.files/image026.gif |  |  |
|  |  | |  | | --- | | Рис. 16.8. Измеритель расхода воздуха с датчиком температуры: 1. Корпус датчика. 2. Измерительная заслонка. 3. Демпферная камера. 4. Пластина демпфера. 5. Резистивный слой потенциометра. 6. .Датчик температуры. 7. Электрический разъем. 8. Спиральная пружина измерительной заслонки. 9. Ползун потенциометра | |  |
|  |  |  |  |

В тело расходомера встроен датчик температуры 6, представляющий собой резистор в виде нити, изготовленной из материала с большим удельным сопротивлением. Наличие этого датчика позволяет измерять температуру газа для расчета его плотности и получения массового расхода при измеренном объемном расходе.

Такая конструкция при сопряжении со вторичным прибором или ЭВМ позволяет достаточно оперативно (постоянная времени около 0,1 с) измерять расход газа в достаточно большом диапазоне.

Сравнительно большое распространение для измерения расхода газов в последнее время получили **термоанемометрические датчики** (рис. 16.9).

Термоанемометрический измеритель расхода воздуха представляет собой автономный блок. Наиболее ответственной частью термоанемометра является канал 1, содержащий последовательно расположенные пластмассовые обоймы с резисторами.

Стабилизирующие решетки 2 служат для защиты датчика от загрязнения и организации равномерного потока воздуха по сечению канала 1, прецизионный резистор 3 и термокомпенсационный элемент 5 предназначены для корректировки показаний измерительной нити 4, которая имеет диаметр 100 мкм и изготовлена из платины.

Сверху канала 1 в корпусе расходомера установлена камера с электронным блоком и электрическим разъемом.

|  |
| --- |
|  |
|  | https://helpiks.org/helpiksorg/baza7/673126955733.files/image029.gif |

Работа датчика основана на том, что измерительная нить 4 разогревается до высокой (по сравнению с окружающей средой) температуры 150 оС.

Обтекающий нить поток воздуха за счет конвективного теплообмена интенсивно отводит теплоту от измерительной нити 4, причем, чем выше скорость потока, тем больше теплоты отводится. В то же время электронный блок термоанемометра автоматически подает на нить такой ток, чтобы ее температура, независимо от скорости потока воздуха (и соответственно – от количества отведенной теплоты), была постоянна и равна 150 0С. То есть, чем выше скорость потока воздуха, тем больший ток подается на нить 4.

Выходным параметром датчика является падение напряжения на прецизионном резисторе 3, включенным в общую измерительную цепь с нитью 4.

В лабораторных условиях в настоящее время для измерения расхода газа часто используются серийно выпускаемые промышленностью счетчики, работа которых основана на различных эффектах (роторные, турбинные, мембранные и т.д.). Наибольший интерес представляют электронные счетчики, работа которых основана на **вихревом эффекте**(рис. 16.10)и ультразвуковые счетчики (см. ниже).

|  |
| --- |
|  |
|  | https://helpiks.org/helpiksorg/baza7/673126955733.files/image030.gif |

В основе принципа действия любого вихревого расходомера лежит широко известное природное явление - образование вихрей за препятствием, стоящим на пути потока. При скоростях среды выше определенного предела вихри образуют регулярную дорожку, называемую «дорожкой Кармана». Частота образования вихрей при этом прямо пропорциональна скорости потока.

В диапазоне чисел Рейнольдса от 2∙104 до 7∙106 коэффициент пропорциональности между частотой образования вихрей и скоростью потока практически не зависит от числа Рейнольдса. Это позволяет вихревым расходомерам с хорошей точностью измерять скорость потока независимо от типа среды.

Основные преимущества вихревых расходомеров

· линейный выходной сигнал

· широкий динамический диапазон измерений

· малая потеря давления

· простота и надежность в эксплуатации

Нормальный рабочий диапазон вихревых расходомеров соответствует диапазону чисел Рейнольдса от 2∙104 и выше до скоростей 10 м/с в случае жидкости и 80 м/с в случае газа или пара.

Рабочие среды (среда должна быть однофазной) - газ, пар, вода, чистые жидкости с низкой вязкостью или умеренно вязкие (до 7 мПа∙с), умеренно коррозионные химикаты, легкие суспензии.

В качестве датчика чаще всего используют пьезокерамические пластинки, вторичный прибор – частотомер, проградуированный в единицах объема. Погрешность определения расхода лежит в пределах 1-1,3%.

Для контроля расхода и учета воды и теплоносителя с 60-х годов прошлого века в промышленности применяются **ультразвуковые расходомеры**. Неоспоримые достоинства ультразвуковых расходомеров: малое или полное отсутствие гидравлического сопротивления, надежность (нет подвижных механических элементов), высокая точность, быстродействие, помехозащищенность – определили их широкое распространение.

Существуют три основные методики определения расхода жидкости при помощи ультразвука:

· время-импульсный метод (фазового сдвига);

· доплеровские расходомеры;

· метод сноса ультразвукового сигнала (корреляционный).

Суть работы ультразвуковых расходомеров любого типа состоит в том, что с обеих сторон трубы устанавливаются излучатель и приемник ультразвуковых колебаний, легко передающихся через жидкость. Течение жидкости в зависимости от скорости потока искажает сигнал, подающийся излучателем, и он доходит до приемника в искаженном виде (сдвинутый по фазе, с изменившейся частотой или просто ослабленный). Чем выше скорость, тем больше изменен сигнал. По этому изменению с помощью различных преобразователей и устанавливают расход жидкости.

Схема ультразвукового расходомера приведена на рис. 16.11.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  |  | https://helpiks.org/helpiksorg/baza7/673126955733.files/image031.gif |  |
|  |  |  |  |
|  | |  | | --- | | Рис. 16.11. Схема работы ультразвукового расходомера | |  |  |

Возбуждение и прием ультразвуковых импульсов производится пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП), устанавливаемыми на измерительном участке трубопровода, в котором производится измерение расхода жидкости.

ПЭП могут работать, как показано на рис. 16.11 (т.е. в одном направлении) но могут работать и сразу в двух направлениях, т.е. попеременно ПЭП является излучателем и приемником. В этом случае сигнал подается сначала «сверху вниз», а затем «снизу вверх». Это позволяет повысить точность измерения.

Такие расходомеры имеют очень малую постоянную времени, измеряемую в сотых долях секунды.

Следует отметить, что вихревые и ультразвуковые измерители расхода имеют одно заметное отрицательное качество – высокую стоимость. В связи с этим их применение должно быть достаточно обосновано.

Очень большую сложность представляет измерение малых и сверхмалых расходов газа, (1 см3/мин и менее) т.к. практически чувствительность известных методов недостаточна для точного определения расхода. Потребность в таких измерениях возникает при испытании уплотнительных устройств на герметичность, расходов через отверстия малого диаметра или щели. Практически в этом случае можно рекомендовать метод, основанный на изменении давления газа в замкнутом объеме (рис. 16.12) или метод, вытеснения жидкости из замкнутого объема (рис. 16.13).

|  |
| --- |
|  |
|  | https://helpiks.org/helpiksorg/baza7/673126955733.files/image032.gif |

Утечки из испытываемого объекта 3 скапливаются под кожухом 2 и поступают в герметичную емкость 4, давление которой растет по мере накопления утечек. Из уравнения состояния для газа, зная разность показаний манометра 5 и суммарный объем емкости 4 и кожуха 2 (в них одновременно повышается давление по мере поступления утечек) можно определить массовый расход утечек за определенный промежуток времени. Для этого способа важна точность манометра 5 (цена деления и класс точности), точность определения суммарного объема и температуры утечек.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
|  |  | https://helpiks.org/helpiksorg/baza7/673126955733.files/image033.gif |  |
|  |  |  |  |
| |  | | --- | | Рис. 16.13. Схема измерения расхода через узкие щели: 1. Баллон со сжатым воздухом. 2. Вентиль баллона. 3. Грубый манометр высокого давления. 4. Редуктор давления. 5. Грубый манометр давления подачи. 6. Дополнительный регулятор давления подачи. 7. Точный манометр давления подачи. 8. Регулятор давления истечения. 9. Емкость с жидкостью. 10. Мерная емкость. 11. Точный манометр для измерения давления истечения. 12. Приспособление для крепления элементов узкой щели | |  |  |  |

Для способа измерения, показанного на рис. 16.13 очень важна герметичность многочисленных соединений и обеспечение достаточно большого объема мерной емкости.

Расходомеры с электронным преобразованием величины расхода в электрический сигнал нашли широкое применение в счетчиках тепловой энергии. В таком счетчике помимо расхода термодатчиком определяется температура потока, а микропроцессор пересчитывает расход теплоносителя и его температуру в количество тепловой энергии, прошедшей через счетчик.

Контрольные вопросы

1. Что называется расходомером?
2. Дать классификацию расходомеров по принципу действия.
3. Устройство и принцип действия теплового расходомера.
4. Устройство и принцип действия электромагнитного расходомера.
5. Устройство и принцип действия вихревого расходомера.