

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Южно-Уральский государственный университет  
Филиал в г. Миассе  
Кафедра автоматики

681.2(07)  
Г617

С.С. Голощапов, М.В. Носиков

## **ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА**

Учебное пособие

Челябинск  
Издательский центр ЮУрГУ  
2022

УДК 681.2.08(075.8)  
Г617

*Одобрено  
учебно-методической комиссией  
филиала ЮУрГУ в г. Миассе*

*Рецензенты:  
А.Г. Малышкин, Е.В. Дутикова*

**Голощанов, С.С.**

Г617      Приборы для измерения расхода: учебное пособие / С.С. Голощанов, М.В. Носиков. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2022. – 47 с.

ISBN 978-5-696-05327-1

В пособии описаны принципы действия приборов для измерения расхода. Рассмотрены основные условия и требования, обуславливающие выбор расходомера. Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах», 12.03.01 «Приборостроение».

УДК 681.2.08(075.8)

ISBN 978-5-696-05327-1

© Издательский центр ЮУрГУ, 2022

## ВВЕДЕНИЕ

Расход – это количество вещества, проходящего через данное сечение в единицу времени. Количество вещества измеряется или в единицах объема (литрах, кубических метрах), или в единицах массы (килограммах, тоннах). Соответственно расход измеряют в единицах объема, деленных на единицу времени (л/с, м<sup>3</sup>/час) или в единицах массы, также деленных на единицу времени (кг/с, т/час). В первом случае имеем объемный расход  $Q_o = dV/dt$ , во втором – массовый  $Q_m = dM/dt$ . Прибор, измеряющий расход вещества, называется расходомером.

Расходомер, снабженный интегратором, позволяет получить объем  $V$  или массу  $M$  вещества, прошедшего через него:

$$V = \int_0^t Q_o dt, \text{ или } M = \int_0^t Q_m dt. \quad (1)$$

Такой прибор называется счетчиком количества или просто счетчиком (ГОСТ 15528–86) [1].

Значение расходомеров очень велико. Расходомеры необходимы для обеспечения заданного или оптимального режима технологических процессов в энергетике (тепловые и атомные электростанции), металлургии, в химической, нефтяной и многих других отраслях промышленности.

Расходомеры требуются для управления работой двигателей ракетно-космических систем, автомобилей. Расходомеры используются при проведении лабораторных и исследовательских работ, в медицинской технике.

Счетчики жидкости и газа необходимы для учета массы или объема веществ, транспортируемых по трубам и потребляемых различными объектами. Они используются в трубопроводном транспорте, в коммунальном хозяйстве. В этих случаях выводится на индикацию только количество вещества, а не собственно расход. Вероятно, многие знакомы с домовыми или квартирными счетчиками в системах водоснабжения, со счетчиками количества топлива, заливаемого в бак автомобиля.

Заметим, что большинство расходомеров измеряют объемный расход. Для того чтобы получить соответствующий массовый расход, необходимо оценить плотность вещества, то есть массу, заключенную в единице объема  $\rho = m/V$ .

Плотность вещества является функцией температуры и давления. Обычно эта функция определяется экспериментально и выражается в виде таблицы или формулы. Для жидких веществ изменение объема  $\Delta V$  при изменении давления  $\Delta P$  весьма мало и определяется коэффициентом сжимаемости  $\beta$ :

$$\Delta V = -\beta V_0 \Delta P, \quad (2)$$

где  $V_0$  – начальный объем.

Так, например, для воды  $\beta \approx 5 \cdot 10^{-10}$  1/Па. При увеличении давления на  $10^6$  Па ( $\approx 10$  атм.) относительное приращение объема составит

$$\Delta V/V_0 = -\beta \Delta P = -5 \cdot 10^{-10} \cdot 10^6 = -5 \cdot 10^{-4} = -0,05 \%$$

Зависимость плотности жидкости от температуры более существенна. Плотность воды при температуре 4 °С максимальна и имеет значение  $10^3$  кг/м<sup>3</sup>. При температуре 90 °С плотность уменьшается до  $0,965 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. При небольших вариациях температуры (водоснабжение) ее влияние на плотность обычно не учитывается. В системах отопления температура теплоносителя изменяется в значительных пределах и для учета ее влияния на плотность необходимо использовать данные с датчиков температуры.

Для газов, в первом приближении, плотность пропорциональна давлению и обратно пропорциональна температуре. Для оценки плотности необходимо применение соответствующих датчиков. Однако это допустимо лишь для однородных однофазных потоков.

Существует и разрабатывается множество типов и разновидностей расходомеров. Рассмотрим основные условия и требования, обуславливающие выбор расходомера.

## **1. Физико-химические свойства вещества, расход которого необходимо измерить**

1.1. Фазовый состав. Основные методы измерения расхода были разработаны для однофазных сред, то есть для жидкости или газа. Иногда возникает необходимость измерения расхода двухфазных и даже трехфазных сред. К ним относятся пульпы (смесь жидкой и твердой фаз), смеси твердой и газообразной фаз (например, пылеугольное топливо), смеси жидкости с газом (нефтегазовая смесь, влажный насыщенный пар), и, наконец, газированная пульпа, представляющая собой смесь всех трех фаз. При измерении расхода многих из этих смесей возникают значительные трудности [3].

1.2. Электропроводность. Этот параметр важен для электромагнитных расходомеров, у которых измеряется ЭДС, индуцируемая в жидкости при пересечении ею магнитного поля.

1.3. Особые свойства (химическая агрессивность, абразивность, токсичность, взрывоопасность). Эти свойства определяют требования к футеровке (облицовке) проточной части расходомера.

1.4. Экстремально низкие или высокие давление и температура. Расход криогенных жидкостей, например, сжиженного водорода, надо измерять при низких температурах (до  $-255$  °С), а расход перегретого пара сверхвысокого давления и расплавленных металлических теплоносителей – при температурах до  $+600$  °С.

1.5. Вязкость. В некоторых типах расходомеров вязкость вещества влияет на показания расходомера, что требует применения специальных методов компенсации.

1.6. Минимально допустимая скорость потока вещества, проходящего через расходомер.

## **2. Требования, предъявляемые к расходомерам**

2.1. Погрешность измерений – одно из основных требований, предъявляемых к расходомерам и счетчикам. Во многих случаях погрешность измерения в

1,5–2 % считается нормальной и достаточно удовлетворительной, однако нередко требуется иметь погрешность не более 0,2–0,5 %.

2.2. Диапазон измерения  $Q_{max}/Q_{min}$  определяет область значений расхода, в которой погрешность измерений не превышает заданное значение. Этот параметр связан с допустимой погрешностью измерений. С ее увеличением диапазон может быть расширен и наоборот. На рис. 1 показаны типичные пределы допускаемой относительной погрешности  $\Delta Q/Q_{max}$  (сплошная линия) для различных диапазонов измерений. Эти пределы обычно приведены в паспорте на преобразователь расхода. Пунктиром показан график фактической погрешности.

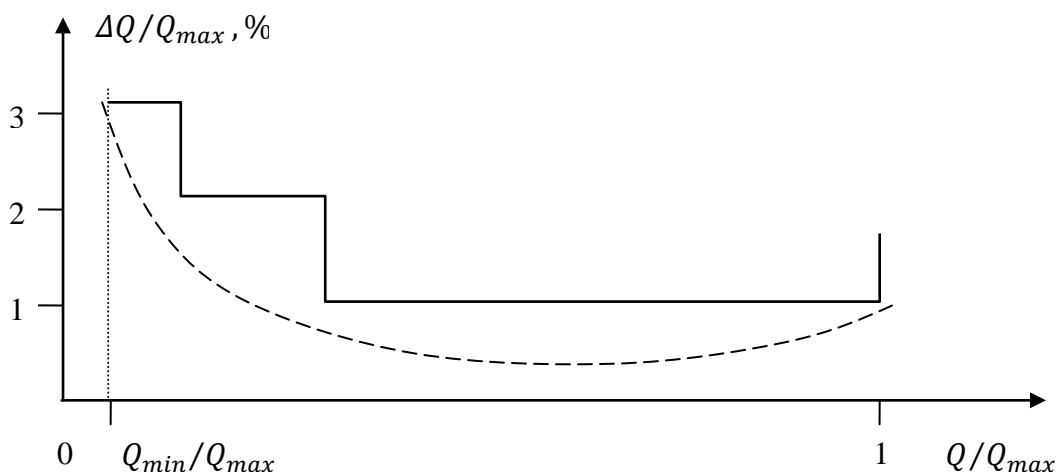


Рис. 1. Типичные пределы допускаемой относительной погрешности для различных диапазонов измерений

2.3. Значения расходов, подлежащих измерению. Для жидкостей значения массового расхода могут составлять от  $10^{-2}$  до  $10^8$  кг/ч, а для газов – от  $10^{-4}$  до  $10^6$  кг/ч. Относительно проще измерить средние расходы. При измерении же очень малых и очень больших расходов нередко возникают затруднения и приходится применять особые методы.

2.4. Быстродействие прибора, определяемое его динамическими характеристиками. Хорошее быстродействие необходимо при измерении быстро меняющихся расходов, а также в случае применения прибора в системе автоматического регулирования. Быстродействие прибора обычно оценивается значением его постоянной времени  $T$  – это время, в течение которого показание прибора при скачкообразном изменении расхода  $\Delta Q$  изменяется приблизительно на две трети от величины скачка  $\Delta Q$  (рис. 2).

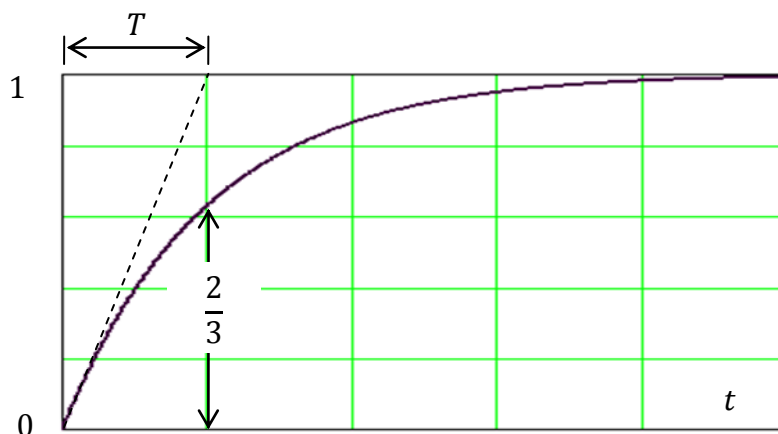


Рис. 2. График переходной характеристики расходомера

2.5. Надежность. Основным показателем надежности является время, в течение которого прибор сохраняет работоспособность и достаточную точность. Это время зависит как от устройства прибора, так и от его назначения и условий применения. Показатель надежности отражен в величине межповерочного интервала, то есть времени работы, по истечении которого проводится поверка прибора метрологической службой.

2.6. Технология поверки. Для большинства расходомеров поверка и градуировка связаны с демонтажом прибора и проливкой его на образцовой расходомерной установке, что усложняет и удорожает эксплуатацию.

2.7. Возможность оперативной чистки и стерилизации расходомера (медицинская техника, биохимические технологии, фармакология).

## 1. РАСХОДОМЕРЫ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Расходомеры переменного перепада давления основаны на зависимости от расхода величины перепада давления, создаваемого устройством, установленным в трубопроводе. В состав расходомера входят преобразователь расхода, создающий перепад давления и дифференциальный манометр, измеряющий этот перепад.

В зависимости от принципа действия преобразователя расхода такие расходомеры подразделяются на несколько групп, внутри которых имеются конструктивные разновидности преобразователей.

Расходомеры с сужающими устройствами – важнейшие среди расходомеров переменного перепада давления. Они уже давно нашли применение в качестве основных промышленных приборов для измерения расхода жидкости, газа и пара. Сужающее устройство расходомера является первичным измерительным преобразователем расхода, в котором в результате сужения сечения потока измеряемой среды (жидкости, газа, пара) образуется перепад давления, зависящий от расхода.

Имеется много разновидностей сужающих устройств. На рис. 3а показана стандартная диафрагма, на рис. 3б – стандартное сопло. На рис. 3в изображена расходомерная труба Вентури, для которой характерна малая потеря давления.

Перед сужающим устройством и после него образуются зоны завихрения, что определяет квадратичную зависимость между расходом  $Q$  и перепадом давления  $\Delta p$ . Это существенный недостаток, потому что его следствие – малый диапазон измерения расходомера ( $Q_{max}/Q_{min} = 3-4$ ). Так, при расходе  $Q = 0,25Q_{max}$  измеряемый перепад составляет лишь 6,25 % от  $\Delta p_{max}$ . Кроме того, возникают затруднения при измерении быстро меняющихся и, в частности, пульсирующих потоков.

Предельная приведенная погрешность расходомеров с сужающими устройствами обычно составляет 1–2 %.

Несмотря на недостатки, такие расходомеры получили самое широкое распространение благодаря следующим достоинствам:

1. Исключительная универсальность применения. Они пригодны для измерения расхода любых однофазных веществ в очень широком диапазоне изменения давлений и температур. Малый диапазон измерения расхода не является препятствием для применения в промышленных установках, работающих в номинальном режиме.

2. Удобство массового производства. Наиболее сложные части комплекта расходомера – дифференциальный манометр (дифманометр) и вторичный преобразователь – можно производить крупными сериями, так как они не зависят от рода вещества и значения расхода.

3. Нет необходимости в применении образцовых расходомерных установок для градуировки и поверки в случае применения стандартных сужающих устройств.

Расходомеры с гидравлическим сопротивлением также основаны на зависимости от расхода перепада давления, создаваемого гидравлическим сопротивлением. Однако режим потока в таком сопротивлении стремятся создать ламинарным, с тем, чтобы перепад давления был пропорциональным расходу. Применяются подобные расходомеры преимущественно для измерения малых расходов, когда сопротивлением является одна или несколько капиллярных трубок (см. рис. 3з).

Центробежные расходомеры созданы на основе зависимости от расхода перепада давления, образующегося в закруглении трубопровода в результате действия центробежной силы в потоке. В качестве преобразователей применяется колено (см. рис. 3д), или, значительно реже, кольцевой участок трубы.

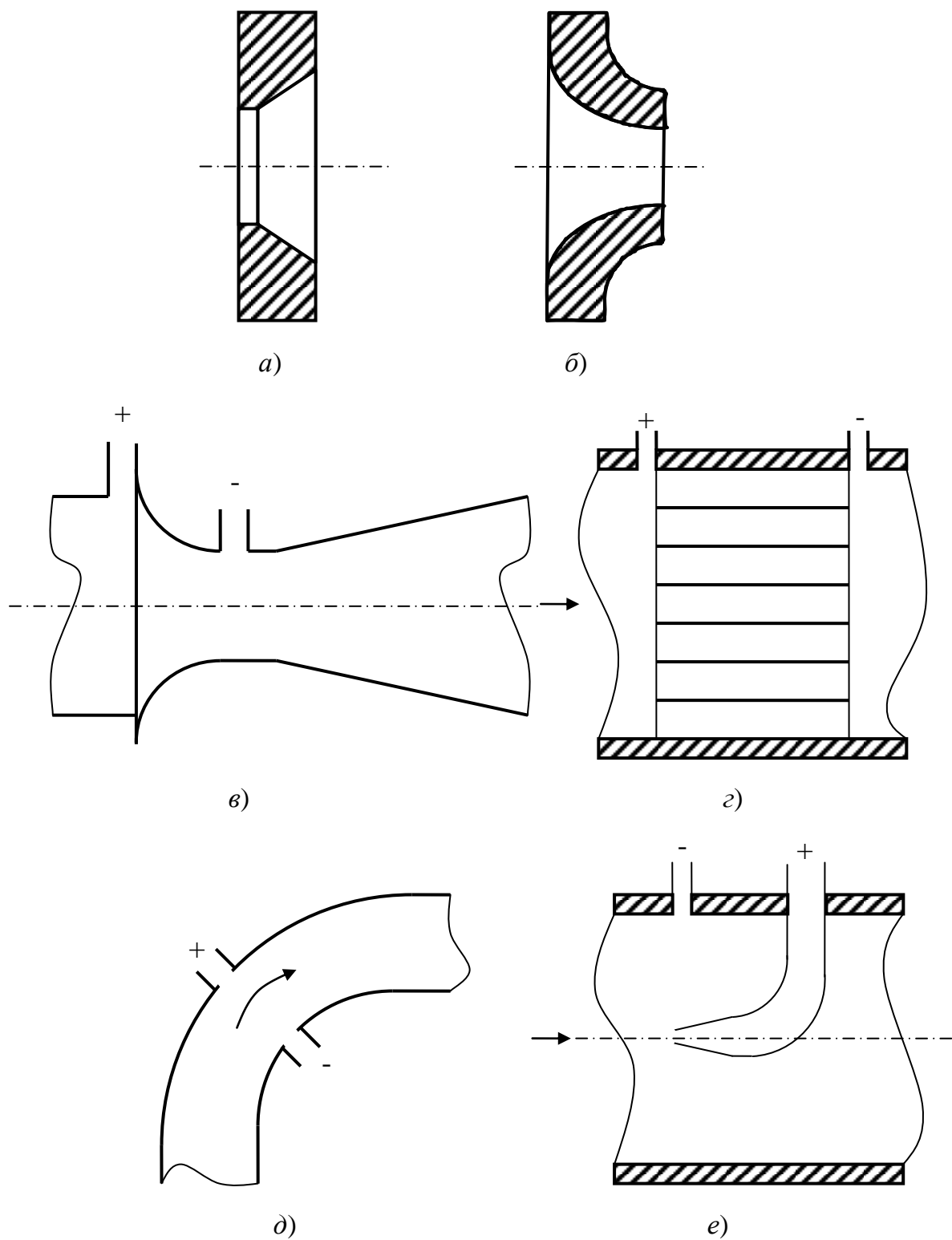


Рис. 3. Разновидности сужающих устройств расходомеров переменного перепада давления



## 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

В соответствии с известным законом электромагнитной индукции Фарадея в проводнике, пересекающем силовые линии магнитного поля, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения проводника. Если заменить проводник потоком проводящей жидкости, текущей между полюсами магнита, и измерять ЭДС, наведённую в жидкости, можно получить принципиальную схему электромагнитного расходомера, предложенную ещё самим Фарадеем.

На рис. 4 изображена принципиальная схема электромагнитного преобразователя расхода. Корпус 2 трубопровода изготовлен из немагнитного материала (обычно нержавеющая сталь) и покрыт внутри неэлектропроводной футеровкой. Корпус помещен между полюсами 1 и 4 электромагнита и снабжен двумя электродами 3 и 5, изолированными от корпуса.

При движении жидкости на электродах наводится ЭДС

$$E = BDV = 4BQ/\pi D, \quad (3)$$

где  $B$  – магнитная индукция,  $D$  – расстояние между концами электродов, равное внутреннему диаметру корпуса,  $V$  и  $Q$  – соответственно средняя скорость и объемный расход жидкости. Таким образом, измеряемая разность потенциалов  $E$  прямо пропорциональна объемному расходу  $Q$ .

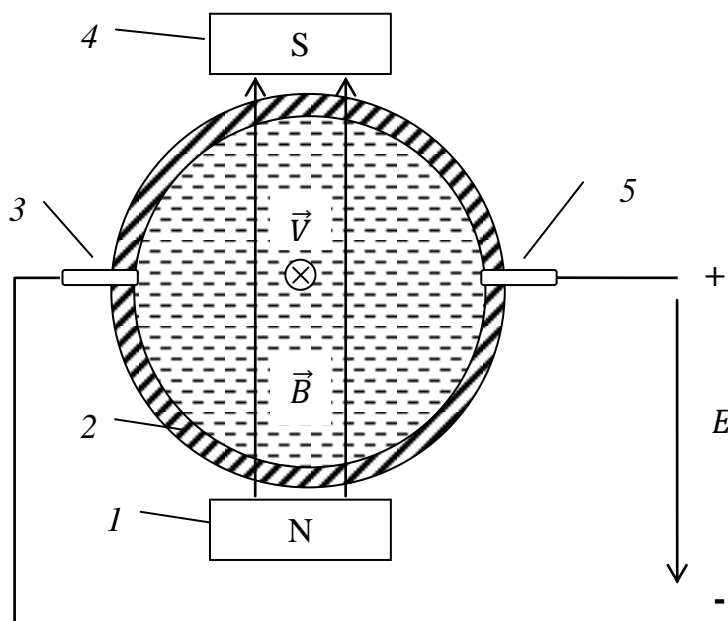


Рис. 4. Принципиальная схема электромагнитного преобразователя расхода

ЭДС, создаваемая первичным преобразователем расхода, невелика. Ее значение при максимальном расходе обычно не превосходит единиц милливольт. При усилении столь слабого сигнала необходимо принять меры для подавления наводок промышленной частоты (50 Гц) и паразитного сигнала, вызванного поляризацией электродов (гальваническая ЭДС) [4]. Весьма эффективным реше-

нием является импульсное питание электромагнитов, создающих магнитное поле (рис. 5).

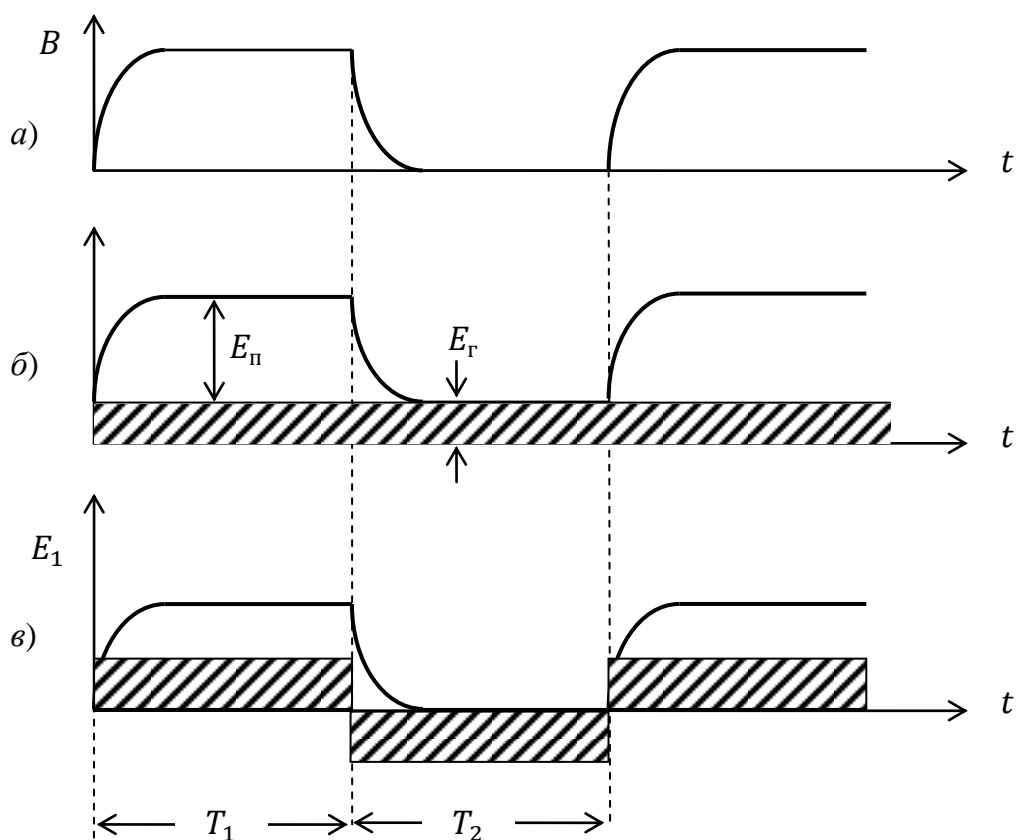


Рис. 5. Графики изменения физических величин при импульсном питании магнитов электромагнитного преобразователя расхода

Здесь  $T_1$  – интервал времени, на котором через обмотки электромагнитов пропускается ток, создающий магнитное поле с индукцией  $B$  (см. рис 5а),  $T_2 = T_1$  – интервал, на котором обмотки обесточены. Эти интервалы кратны периоду питающей сети (20 мс), благодаря чему происходит самокомпенсация сетевых наводок.

На электродах формируется сигнал  $E$ , состоящий из полезной составляющей  $E_{\text{п}}$ , пропорциональной расходу, и паразитной гальванической  $E_{\text{г}}$  (см. рис. 5б). Для компенсации паразитной составляющей используется схема, представленная на рис. 6.

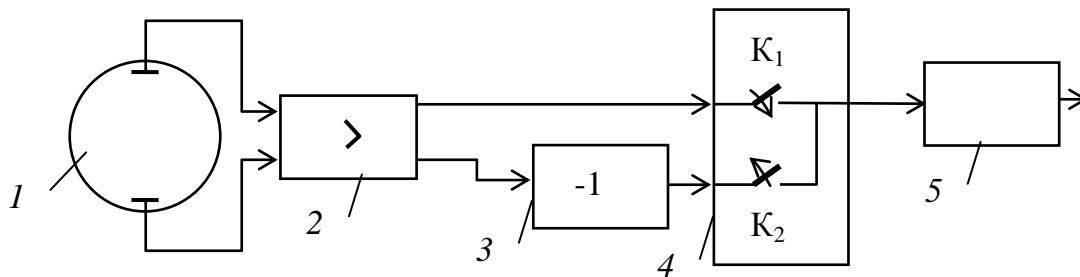


Рис. 6. Схема компенсации паразитной составляющей  $E_T$  выходного сигнала электромагнитного преобразователя расхода

Здесь 1 – первичный преобразователь, 2 – усилитель, 3 – инвертор, 4 – коммутатор, 5 – фильтр низкой частоты. На интервале  $T_1$  ключ коммутатора  $K_1$  замкнут, ключ  $K_2$  – разомкнут. На выход коммутатора поступает сигнал  $E = E_n + E_T$ . На интервале  $T_2$  ключ  $K_1$  разомкнут, ключ  $K_2$  – замкнут и на выход коммутатора поступает инвертированный сигнал  $-E_T$ . В результате на входе фильтра формируется сигнал  $E_1$  (см. рис. 5в). На выходе фильтра формируется среднее значение полезного сигнала, пропорциональное расходу, а среднее значение паразитного сигнала будет равно нулю. Расходомеры с импульсным возбуждением имеют относительную погрешность в пределах  $\pm(0,2-0,5)\%$ .

Сфера применения электромагнитных расходомеров очень велика. Можно измерять расход водопроводной воды и сточных вод, щелочей, кислот и других жидкостей, применяемых в химической промышленности, соков, сиропов, в пищевой промышленности. Кроме того, электромагнитный метод применяется для измерения расхода пульпы, расплавленных металлов, расхода крови в медицинской и физиологической практике, для измерения скорости морских течений, воды в открытых руслах.

Широта применения обусловлена достоинствами электромагнитных расходомеров: независимость показаний от вязкости и плотности измеряемого вещества, возможность применения в трубах любого диаметра, практическое отсутствие потери давления, линейность шкалы, высокое быстродействие, возможность измерения агрессивных, абразивных и вязких жидкостей.

Преобразователь расходомера и технологический трубопровод можно чистить и стерилизовать без демонтажа. Поэтому эти расходомеры используют в биохимической и пищевой промышленности, медицинской технике, где доминирующими являются требования к стерильности среды.

Электромагнитные расходомеры используются для измерения очень малых ( $3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ ) расходов (например, для измерения расхода крови по кровеносным сосудам) и больших расходов жидкостей ( $3 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Причём диапазон измерения расходомера одного типоразмера достигает значения  $Q_{max}/Q_{min} = 500$ .

Ограничением применения электромагнитных расходомеров является проводимость вещества, подлежащего измерению. Серийно выпускаемые расходо-

меры пригодны для веществ, удельная электропроводность которых не менее  $10^{-3} - 10^{-5}$  См/м. Однако за счет применения специальных мер удается уменьшить это ограничение на несколько порядков.

### 3. ВИХРЕВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

В основе принципа действия вихревого расходомера лежит 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:

$$f = Sh \cdot (V/d), \quad (4)$$

где  $f$  – частота образования вихрей Кармана;

$Sh$  – число Струхалия;

$V$  – скорость потока среды;

$d$  – ширина тела обтекания.

Число Струхалия – безразмерная величина, один из критериев подобия течений жидкостей и газов, характеризующий постоянство протекания процессов во времени. Число Струхалия является функцией числа Рейнольдса, и в диапазоне устойчивого вихреобразования действует эмпирический закон постоянства числа Струхалия:  $Sh \cong 0,2$ .

Поскольку частота образования вихрей пропорциональна скорости потока, то, измеряя эту частоту, можно судить о скорости  $V$ , а значит, и объемном расходе потока.

Имеется много способов преобразования вихревых колебаний в выходной сигнал. Некоторые из них основаны на использовании периодических колебаний давления или скорости струй с обеих сторон обтекаемого тела. Для преобразования пульсаций скорости можно использовать один или два термоанемометра. На рис. 7а два элемента термоанемометра (обозначены черными кружками) помещены на лобовой стороне обтекаемого тела. Их встречное включение усиливает измерительный сигнал, а симметричное расположение способствует компенсации вредного влияния помех. На рис. 7б элемент термоанемометра помещен внутри сквозного отверстия в теле, а на рис. 7в в обводной трубке, находящейся снаружи трубопровода. При каждой пульсации давления с обеих сторон тела возникает движение через сквозное отверстие или через обводную трубку, вызывающее изменение сопротивления элемента термоанемометра. Если вместо элемента термоанемометра в отверстие или обводную трубку поместить ферромагнитный шарик или мембрану, то они станут колебаться с частотой пульсации давления или, что тоже, с частотой срыва вихрей с обеих сторон тела. Эти колебания с помощью индуктивного или емкостного преобразователя образуют выходной сигнал. Недостатком таких преобразователей является возможность закупоривания сквозного отверстия или обводной трубки.

Этого недостатка лишен метод изгибных напряжений. Суть этого метода заключается в том, что формирование вихрей на теле обтекания приводит к возникновению переменного давления, приложенного к телу обтекания и к возникновению малых изгибных напряжений в нем с той же самой частотой, что и частота образования вихрей. Эти изгибные напряжения регистрируются пьезодатчиками, расположенными в теле обтекания.

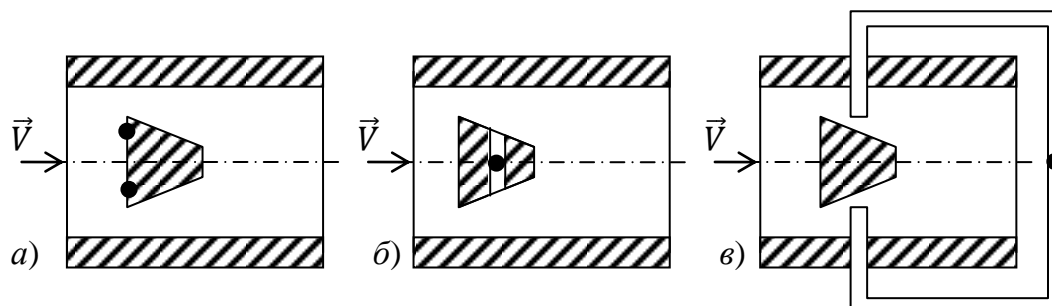


Рис. 7. Варианты расположения элементов термоанемометра для преобразования вихревых колебаний в выходной сигнал

Весьма большое распространение получили вихреакустические преобразователи расхода. Принцип работы преобразователя основан на ультразвуковом детектировании вихрей, образующихся в потоке жидкости при обтекании ею призмы, расположенной поперек потока. Блок-схема преобразователя приведена на рис. 8.

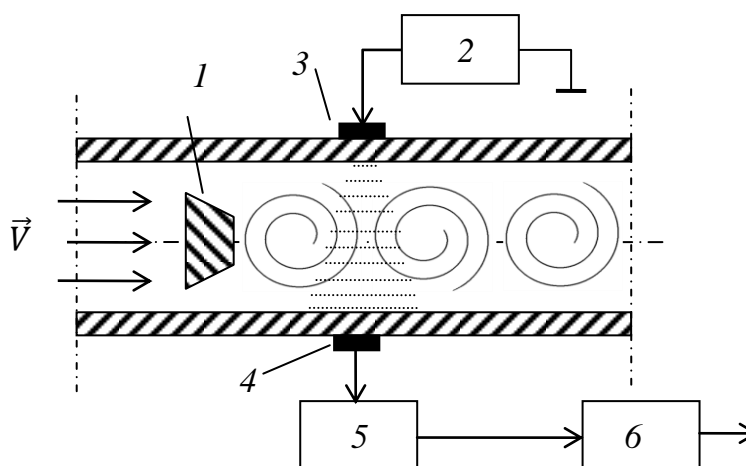


Рис. 8. Блок-схема вихреакустического преобразователя расхода

Преобразователь содержит тело обтекания – призму трапецеидального сечения 1, которая расположена на входе жидкости в проточную часть. При обте-

кании этого тела потоком жидкости за ним образуется вихревая дорожка, частота вихрей в которой пропорциональна расходу.

От генератора 2 на пьезоэлемент-излучатель 3 подается переменное напряжение, которое преобразуется в ультразвуковые колебания. Пройдя через поток, эти колебания в результате взаимодействия с вихрями оказываются модулированными по фазе. На пьезоэлементе-приемнике 4 ультразвуковые колебания преобразуются в электрические, которые и подаются на фазовый детектор 5. На фазовом детекторе определяется разность фаз между сигналами с пьезоэлемента-приемника 4 и опорного генератора 2. Сигнал с фазового детектора подается на блок формирования 6, который выдает импульсы с частотой следования, пропорциональной расходу.

Для компенсации влияния паразитных факторов, возникающих в проточной части (вибрация трубопровода) применяются двухлучевые преобразователи. В этом случае за телом обтекания размещены диаметрально противоположно две пары пьезоэлементов. При этом на фазовом детекторе определяется разность фаз между сигналами с приемников 1-й и 2-й пары.

#### 4. ТАХОМЕТРИЧЕСКИЕ РАСХОДОМЕРЫ

Тахометрическими называются расходомеры и счетчики, имеющие подвижный, обычно вращающийся элемент, скорость движения которого пропорциональна объемному расходу. Тахометрические преобразователи расхода могут использоваться как в счетчиках количества, так и в расходомерах. В первом случае преобразователь расхода (например, крыльчатка) связан со счетным механизмом. В частности, давно получили широкое применение тахометрические счетчики воды и газа. Такие расходомеры содержат преобразователи частоты вращения чувствительного элемента в электрический сигнал.

Тахометрические расходомеры подразделяются на аксиальные и тангенциальные. У первых ось совпадает с направлением потока (рис. 9а), у вторых она перпендикулярна потоку (рис. 9б).

Среди бесконтактных преобразователей, преобразующих скорость вращения крыльчатки в электрический сигнал, наибольшее распространение получили *магнитоиндукционные* типы (см. рис 9а). Здесь 1 – крыльчатка, 2 – опоры, 3 – преобразователь, 4 – корпус. Преобразователь представляет собой катушку с постоянным магнитом. При прохождении ферромагнитной лопасти крыльчатки мимо магнита происходит изменение магнитного поля, что вызывает появление импульса напряжения в обмотке. Очевидно, что частота следования этих импульсов будет равна числу оборотов крыльчатки, умноженному на число лопастей.

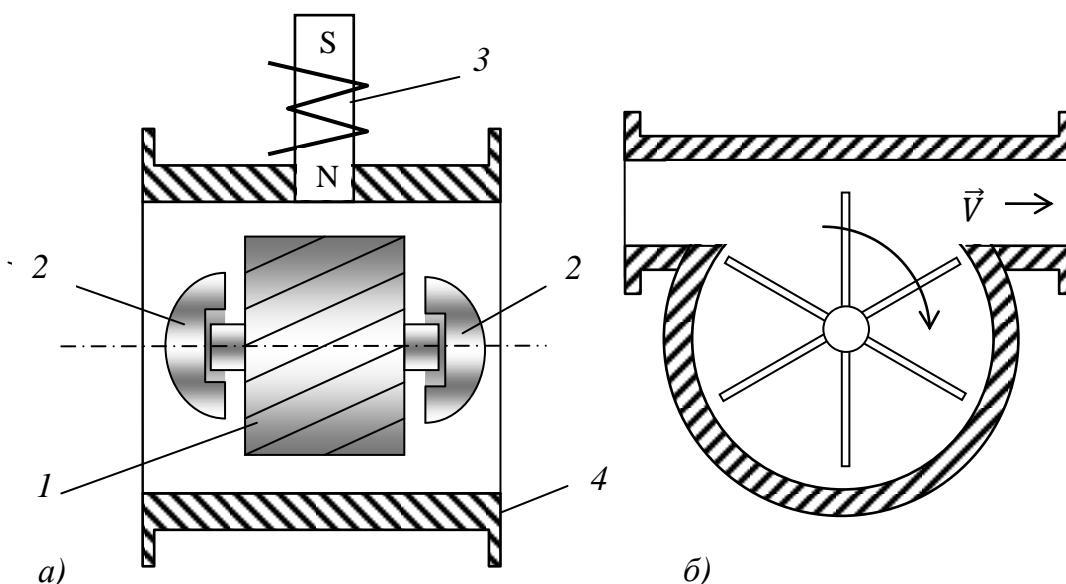


Рис. 9. Схема расположения вращающегося элемента у аксиального (а) и тангенциального (б) тахометрических расходомеров

*Индуктивные* преобразователи основаны на изменении индуктивности наружной обмотки вследствие изменения сопротивления магнитной цепи при проходе лопастей крыльчатки мимо катушки. Это вызывает периодическое изменение выходного сигнала, частота модуляции которого пропорциональна объемному расходу.

*Фотоэлектрические* преобразователи основаны на появлении пульсирующего напряжения на фотоэлементе при периодическом прерывании вращающейся крыльчаткой луча света, падающего на фотоэлемент.

Основные достоинства тахометрических расходомеров – хорошее быстродействие, большой диапазон измерения, высокая точность (погрешность  $\pm(0,5\div 2)\%$ ). Основной недостаток – изнашивание опор, чувствительность к механическим примесям.

## 5. АКУСТИЧЕСКИЕ РАСХОДОМЕРЫ

Акустическими называются расходомеры, основанные на измерении зависящего от расхода того или иного эффекта, возникающего при прохождении акустических колебаний через поток жидкости или газа. Почти все применяемые на практике акустические расходомеры работают в ультразвуковом диапазоне частот и поэтому называются ультразвуковыми.

Для ввода акустических колебаний в поток и для приема их на выходе из потока необходимы излучатели и приемники колебаний – главные элементы первичных преобразователей ультразвуковых расходомеров. При деформации в

определенных направлениях некоторых кристаллов (пьезоэлементов) на их поверхностях образуются электрические заряды, и наоборот, если на этих поверхностях создать разность потенциалов, то кристалл деформируется. Таким образом, пьезоэлемент может работать и как излучатель, и как приемник колебаний. В настоящее время в качестве пьезоэлементов в основном используют пьезокерамические материалы (титанат бария, цирконаттитаната свинца).

Существует множество разновидностей ультразвуковых расходомеров, в частности, расходомеры, основанные на эффекте Допплера. Встречаются приборы, в которых акустические колебания направляются перпендикулярно к потоку. Измеряется степень отклонения (сноса) этих колебаний от первоначального направления, зависящая от скорости потока.

Однако главное распространение получили приборы, основанные на измерении разности времен прохождения акустических колебаний по потоку и против него (рис. 10). Здесь ПЭ – пьезоэлементы,  $L$  – расстояние между пьезоэлементами,  $\alpha$  – угол между направлением распространения колебаний и осью трубы,  $\vec{V}$  – скорость потока.

Проекция скорости  $\vec{V}$  на направление  $L$  дает  $V \cos \alpha$ . Если звуковой луч направлен в сторону движения потока, то время  $t_1$  прохождения им расстояния  $L$  определится из выражения  $t_1 = L/(c + V \cos \alpha)$ , где  $c$  – скорость распространения акустических колебаний в неподвижной среде. При обратном направлении звукового луча время прохождения того же расстояния будет больше, как это следует из выражения  $t_2 = L/(c - V \cos \alpha)$ .

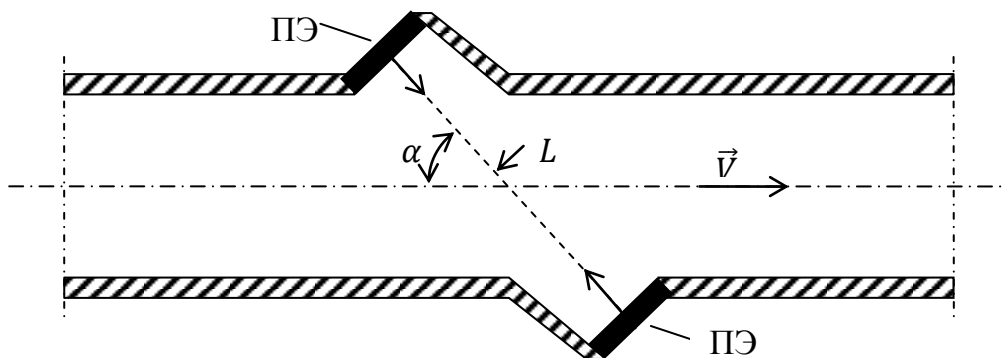


Рис. 10. Схема измерения разности времен прохождения колебаний по потоку и против него в составе ультразвукового расходомера

Разность времен прохождения

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2L}{c^2} \frac{V \cos \alpha}{1 - \left(\frac{V \cos \alpha}{c}\right)^2}. \quad (5)$$

Учитывая, что  $(V/c)^2 \ll 1$  (напомним,  $V$  – скорость потока,  $c$  – скорость звука в данной среде), получим



$$\Delta t = \frac{2L}{c^2} V \cos \alpha. \quad (6)$$

Таким образом, разность времен  $\Delta t$  прямо пропорциональна скорости потока, усредненной по длине  $L$ .

Имеется несколько способов измерения значения  $\Delta t$ : фазовый, при котором измеряется разность фазовых сдвигов акустических колебаний, направляемых по потоку и против него (фазовые расходомеры); метод непосредственного измерения  $\Delta t$  (временноразмерные расходомеры); метод, при котором измеряется разность частот повторения пакетов акустических колебаний, направляемых по потоку и против него (частотные расходомеры).

Наибольшее распространение получил частотный метод, который может обеспечить наибольшую точность измерения – приведенная погрешность может быть снижена до (0,5–1)%. Созданы приборы с еще меньшей погрешностью, вплоть до (0,1–0,2)%, что позволяет применять такие приборы в качестве образцовых.

При измерении расхода чистых жидкостей обычно применяют высокие частоты (0,1–10) МГц. При измерении загрязненных веществ необходимо, чтобы длина волны была на порядок больше диаметра твердых частиц или газовых пузырей.

Это позволяет избежать рассеяния и поглощения акустических колебаний. В связи с этим приходится снижать частоту колебаний до нескольких десятков килогерц. В таких случаях, а также при необходимости измерения малых скоростей вплоть до 0,02 м/с, фазовые расходомеры имеют преимущество перед частотными.

Весьма широк температурный диапазон применения ультразвуковых расходомеров: от температуры жидкого кислорода (–219 °С) до температур 600 °С и выше.

Особо следует отметить возможность использования ультразвуковых преобразователей в составе накладных расходомеров (рис. 11). Такие расходомеры могут быть использованы как стационарные, так и переносные для оперативного измерения и контроля.

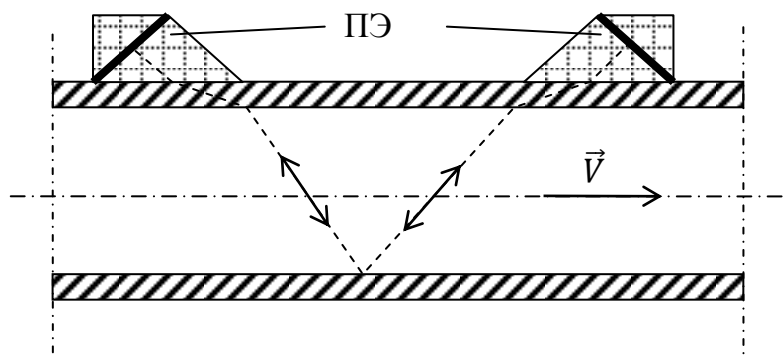


Рис. 11. Принцип работы ультразвукового накладного расходомера

Преимущества: простая установка, не требующая врезки в трубопровод или остановки потока; минимальное техобслуживание – внешние преобразователи не требуют периодической очистки; отсутствие подвижных частей, подверженных износу или загрязнению; отсутствие перепадов давления и энергетических потерь.

## 6. МЕТОЧНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Меточными называют расходомеры, основанные на измерении времени перемещения какой-либо характерной части (метки) потока на контрольном участке пути. Метку в потоке создают искусственным путем. Радиоактивные, физико-химические и некоторые оптические метки создают путем ввода в поток постороннего вещества-индикатора. В других случаях метка образуется в самом потоке без ввода постороннего вещества – например путем ионизации части вещества потока.

Меточные расходомеры – приборы дискретного действия, но при высокой частоте образования меток можно практически говорить о непрерывном измерении расхода. В основном меточные расходомеры применяют не в качестве эксплуатационных приборов для непрерывного измерения, а для различных лабораторных и исследовательских работ, и, в частности, при градуировке и поверке других расходомеров.

Погрешность измерения у меточных расходомеров колеблется от  $(0,1 \div 0,2)$  до  $(2 \div 3)$  % в зависимости от рода метки, измерительной аппаратуры и способа детектирования. Длина контрольного участка может быть от нескольких миллиметров до нескольких километров.

Меточные расходомеры могут быть с одним или двумя детекторами метки. В первом случае (рис. 12а) контрольное расстояние  $L$  считается от места ввода метки 1 до детектора 2, во втором (рис. 12б) – между двумя детекторами 2 и 3.

Скорость метки  $V$  определяется из выражения  $V = L/\Delta\tau$ , где  $\Delta\tau$  – измеряемое время перемещения метки на расстоянии  $L$ . Объемный расход можно определить по формуле

$$Q_o = kLS/\Delta\tau, \quad (7)$$

где  $k = V_c/V$  – отношение средней скорости потока  $V_c$  к скорости метки  $V$ ;  $S$  – площадь поперечного сечения трубопровода.

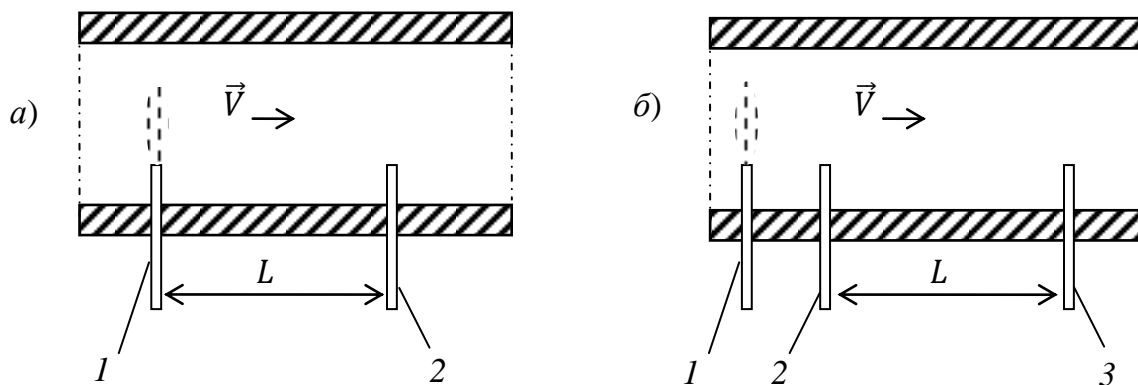


Рис. 12. Меточные расходомеры с одним (а) и двумя (б) детекторами меток

*Радиоактивные метки* в измеряемом веществе создаются путем ввода в него того или иного изотопа, дающего обычно  $\gamma$ -излучение, хорошо проникающее через стенки трубы. Приборы с радиоактивными метками применяют для измерения расхода как жидкостей, так и газов. В качестве детекторов меток обычно применяют сцинтилляционные счетчики.

*Приборы с физико-химическими метками* также могут служить для измерения расхода жидкостей и газов. Для измерения расхода воды обычно применяют солевые метки. Метки формируются вводом в поток раствора соли, а детекторами служат стержневые электроды, которые позволяют фиксировать изменение сопротивления среды при прохождении метки. Применение солевых меток оказалось весьма целесообразным для измерения особенно больших расходов воды в трубах и открытых каналах и реках.

При измерении расхода газа в качестве вещества-индикатора часто используют галоиды (фреон, четыреххлористый углерод). Детектор – два электрода под напряжением. Когда в межэлектродном пространстве оказывается индикатор, сила тока резко возрастает. Галоидные метки были с успехом применены для контроля состояния сужающих устройств (диафрагм) на газопроводе Бухара-Урал. Длина контрольного участка составляла 50 км.

*Оптическими метками* могут быть индикаторы, по своим оптическим свойствам отличные от измеряемого вещества. Для формирования устойчивых меток необходимо, чтобы плотности индикатора и измеряемого вещества были близки друг другу. Веществами-индикаторами, создающими оптические метки, могут быть алюминиевая стружка, порошки, окрашенные жидкости и различные эмульсии. Детекторы – оптические системы, реагирующие на изменение оптических свойств потока.

*Ионизационные метки* создаются в газовом потоке ионизационным излучением с помощью радиоактивного изотопа или электрическим разрядом.

*Расходомеры с тепловыми метками* можно применять для измерения расхода как жидкости, так и газа. Они состоят из нагревателя, создающего тепловую метку, и детектора-термопреобразователя.

В приборах с электромагнитными *метками* катушка, расположенная рядом с трубопроводом или намотанная на него, создает токовую или магнитную метку. В контрольном сечении расположена вторая катушка, в которой возникает импульс тока при проходе метки.

## 7. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Между меточными и корреляционными расходомерами имеется много общего. В том и другом случае на концах контрольного участка длиной  $L$  устанавливаются преобразователи (детекторы), служащие для определения времени  $\tau_{\Pi}$  прохода потоком этого участка. Но в одном случае в поток вводится метка и преобразователи вырабатывают дискретные сигналы при проходе потоком контрольного участка, а в другом – преобразователи вырабатывают непрерывные сигналы, соответствующие случайным изменениям параметров в контрольных сечениях.

Дело в том, что потоки не строго однородны. Те или иные свойства или параметры потока (температура, плотность, электрическая проводимость и т. д.) непрерывно меняются случайным образом. Однако, если детекторы отстоят друг от друга на небольшом расстоянии, то сигналы, генерируемые ими, будут в значительной степени взаимосвязаны (коррелированы). Эти сигналы представлены на рис. 13а. Здесь  $x(t)$  – сигнал с первого (по ходу потока) детектора,  $y(t)$  – сигнал со второго детектора,  $\tau_{\Pi}$  – время прохождения потока между детекторами. Степень взаимосвязи сигналов определяется корреляционной функцией

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t - \tau) y(t) dt \quad (8)$$

где  $T$  – период измерения. Эта функция имеет явно выраженный максимум, когда время задержки первого сигнала  $\tau$  равно времени перемещения потока  $\tau_{\Pi}$  между детекторами (рис. 13, б).

Условная схема корреляционного расходомера показана на рис. 14. Контролируемые параметры потока воспринимаются двумя детекторами 1 и 2, расположенными на расстоянии  $L$  друг от друга. Блок 3 вводит запаздывание на величину  $\tau$ , то есть преобразует сигнал  $x(t)$  в сигнал  $x(t - \tau)$ . Блок 4 формирует произведение  $x(t - \tau)y(t)$ , блок 5 интегрирует это произведение и выдает его среднее значение за период  $T$ . Варьируя время задержки  $\tau$ , можно определить такое его значение, при котором обеспечивается максимум корреляционной функции, а в этом случае  $\tau = \tau_{\Pi}$ .

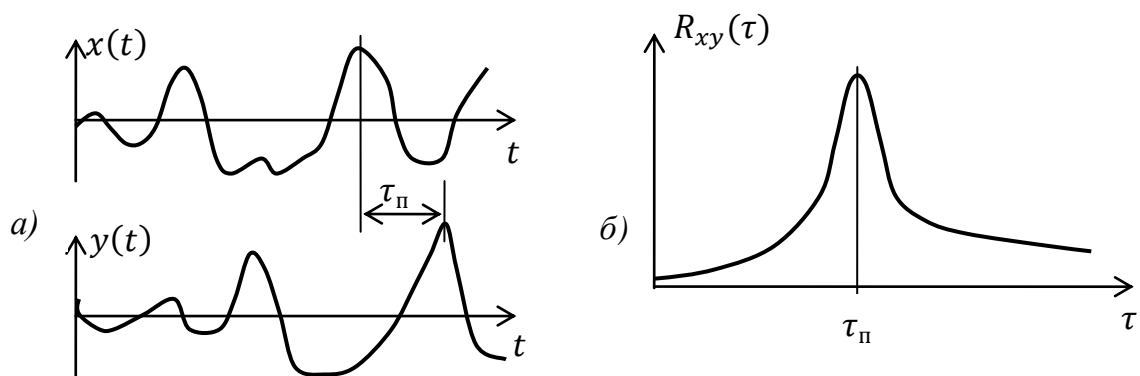


Рис. 13. Коррелированные сигналы (а) и корреляционная функция (б) при измерении времени прохождения потока между детекторами корреляционного расходомера

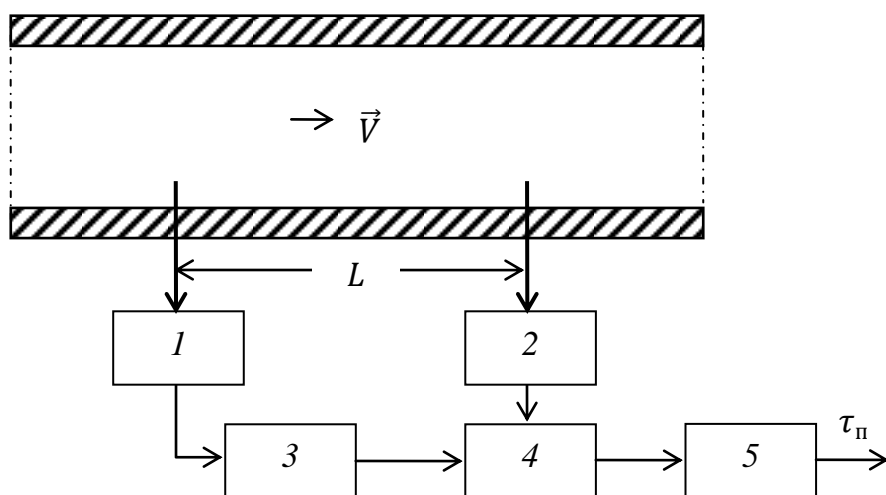


Рис. 14. Принципиальная схема корреляционного расходомера

Объемный расход определяется из выражения  $Q_o = kSL/\tau_{\pi}$ , где  $k$  – поправочный коэффициент, учитывающий профиль скоростей,  $S$  – площадь поперечного сечения потока.

Достоинства корреляционных расходомеров: возможность применения для измерения расхода загрязненных сред, многофазных потоков и расплавленных металлов; отсутствие потери давления.

Недостатки корреляционных расходомеров: длительность процесса измерения, поскольку с уменьшением периода измерения  $T$  погрешность возрастает; ограниченная точность – обычно погрешность измерения составляет более 2%.

Существует много вариантов корреляционных расходомеров в зависимости от вида и способа измерения параметров. Широкое промышленное применение

нашли *ультразвуковые корреляционные расходомеры*. В двух контрольных сечениях снаружи или внутри трубы устанавливаются излучатели акустических колебаний частотой около 1 МГц. Колебания направлены перпендикулярно к оси трубы и воспринимаются пьезопреобразователем на противоположной стороне трубы. Неоднородности в жидкости в виде твердых частиц или газовых пузырей вызывают модуляцию акустических колебаний, поступающих на приемники.

В *оптических корреляционных расходомерах* используются световоды из оптоволокна, установленные в контрольных сечениях. Через эти световоды диоды посылают лучи, которые отражаются от неоднородностей потока и воспринимаются фотопреобразователями.

*Диэлектрические корреляционные расходомеры* реагируют на изменение емкости и имеют в каждом контрольном сечении по электроду в виде тонкого полукольца, изолированного от трубы. Заземленная труба образует противоположный электрод. Такие расходомеры целесообразны для измерения расхода воздушных потоков, переносящих цемент, муку, зерно.

*Кондуктометрические корреляционные расходомеры*, основанные на измерении изменения электрической проводимости, имеют в контрольных сечениях электроды. Они весьма пригодны для измерения расхода различных пульп. Их измерительные схемы очень просты, они проще и дешевле, чем ультразвуковые, однако непригодны, если поток дает осадки, залепляющие электроды.

## 8. КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Принцип работы концентрационных расходомеров основан на зависимости от расхода кратности разбавления вещества индикатора, вводимого в поток. Существенное достоинство концентрационного метода измерения расхода – отсутствие необходимости знать размеры поперечного сечения трубопровода или другого канала. Применение специальных веществ-индикаторов позволяет применять концентрационный метод для измерения расхода газа и пара. Особенно целесообразен данный метод при разовых измерениях больших расходов в закрытых и открытых каналах, а также при проверке работы других расходомеров, так как при этом не требуется осуществлять демонтаж их преобразователей расхода. К недостаткам метода можно отнести:

1. Необходимость иметь большую длину пути  $L$  (порядка  $100D$ , где  $D$  – диаметр трубопровода) для хорошего перемешивания вещества-индикатора. Установка дополнительных местных гидравлических сопротивлений или турбулизаторов сокращают необходимую длину  $L$ .

2. Необходимость точного измерения очень малых конечных концентраций.

Погрешность измерения расхода концентрационным методом лежит в пределах от  $\pm(0,5-1)\%$  до  $\pm(2-3)\%$ . Разработаны и реализованы два варианта концентрационного метода. В первом производится непрерывный (в течении нескольких минут) ввод вещества-индикатора и при этом измеряется его расход

(рис. 15, кривая 2). Во втором варианте производится кратковременный или залповый ввод известного количества вещества-индикатора (рис. 15, кривая 1).

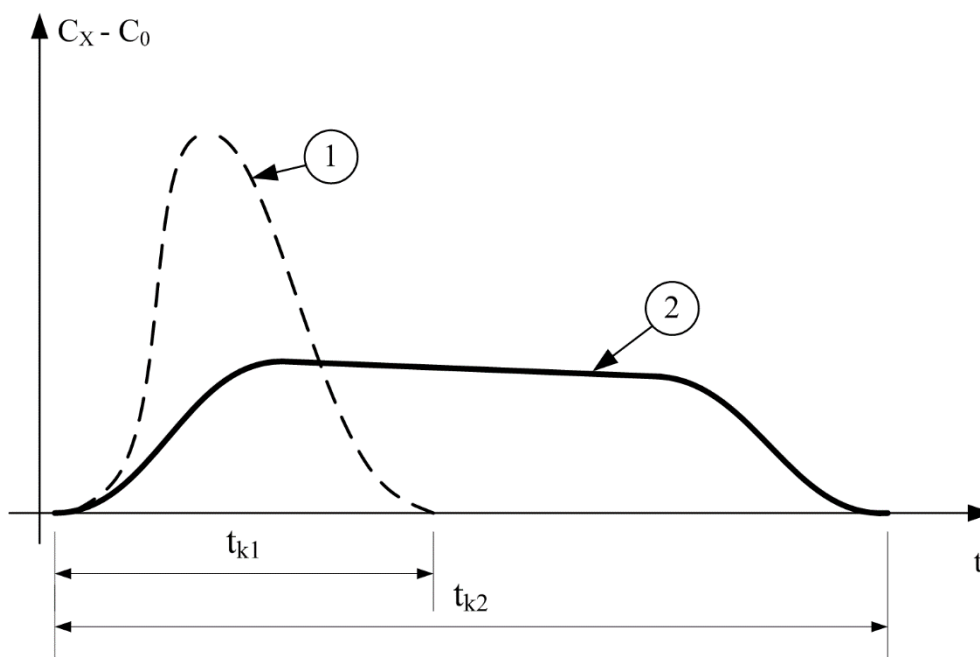


Рис. 15. Концентрация вещества-индикатора в потоке после смешения для кратковременного (1) и непрерывного (2) ввода

Принцип действия концентрационного расходомера с **непрерывным вводом индикатора** состоит в измерении кратности разбавления индикатора после смешения с измеряемым веществом. Здесь в течении интервала времени  $t_{\text{в}}$  поток вводится индикатор, объемный расход которого  $q_{\text{и}}$ , и начальная концентрация  $C_{\text{и}}$  которого должны быть известны. Интервал  $t$  должен быть не меньше такого, которое обеспечит в контрольном сечении после надлежащего смешения с измеряемым веществом постоянной концентрации  $C_X$  индикатора в течении по крайней мере нескольких минут. Интервал  $t$  обычно выбирают от 5 до 30 минут. Тогда объемный расход  $Q_0$  измеряемого вещества можно будет найти из уравнения баланса индикатора

$$Q_0 C_0 + q_{\text{и}} C_{\text{и}} = (Q_0 + q_{\text{и}}) C_X, \quad (9)$$

где  $C_0$  — возможная начальная концентрация индикатора в измеряемом веществе. Решая это уравнение относительно  $Q_0$ , получим:

$$Q_0 = q_{\text{и}} (C_{\text{и}} - C_X) / (C_X - C_0) \quad (10)$$

Если  $C_0 = 0$  и  $C_X \ll C_{\text{и}}$ , то уравнение принимает вид

$$Q_0 = q_{\text{и}} C_{\text{и}} / C_X \quad (11)$$

У концентрационных расходомеров с **кратковременным (залповым) вводом вещества-индикатора** в поток, расход которого  $Q_0$  определяется с большой скоростью вводится вещество-индикатор, объем  $V_{И}$  и концентрация  $C_{И}$  которого известны. После полного смешения его с измеряемым веществом, при котором достигается равномерное распределение индикатора, по сечению потока производится непрерывное (или дискретное, с достаточным для требуемой точности периодом дискретизации) измерение переменной во времени концентрации  $C_X$  индикатора в потоке в течении времени  $t_k$ , обеспечивающем полный проход индикатора через контрольное сечение. В этом случае уравнение баланса индикатора имеет вид:

$$Q_0 t_k C_0 + V_{И} C_{И} = [(Q_0 t_k + V_{И}) / t_{И}] \int_0^{t_k} C_X dt \quad (12)$$

где  $C_0$  – возможная начальная концентрация индикатора в измеряемом веществе.

При выполнении условий  $C_0 = 0$  и  $C_X \ll C_{И}$ , то уравнение разрешенное относительно  $Q_0$  принимает вид:

$$Q_0 = V_{И} C_{И} / \int_0^{t_k} C_X dt \quad (13)$$

Условная схема концентрационного расходомера показана на рис. 16. В резервуаре 1 содержится вещество-индикатор (как правило, раствор). В зависимости от режима работы (непрерывный или кратковременный) насос-дозатор 2 по команде от управляющего устройства 8 осуществляет подачу вещества-индикатора через трубку 3 в поток контролируемого вещества, протекающего по трубопроводу 4. На расстоянии  $L_{от}$  подающей трубки расположена принимающая трубка 5. Между подающей и принимающей трубкой могут быть расположены устройства 9, нормализующие распределение вещества-индикатора по объему контролируемого потока. Требуемую для измерения дозу (объем) протекающего потока посредством устройства отбора (дозирования) 6 подают в измерительное устройство 7, формирующее на выходе сигнал, функционально связанный с концентрацией вещества-индикатора (химическое титрование, калориметрический, флуорометрический способы измерения концентрации). Вычислительное устройство 8 управляет исполнительными устройствами, осуществляет расчет мгновенного расхода  $Q_0$ , осуществляет передачу информационного сигнала в систему управления или измерения более высокого уровня.



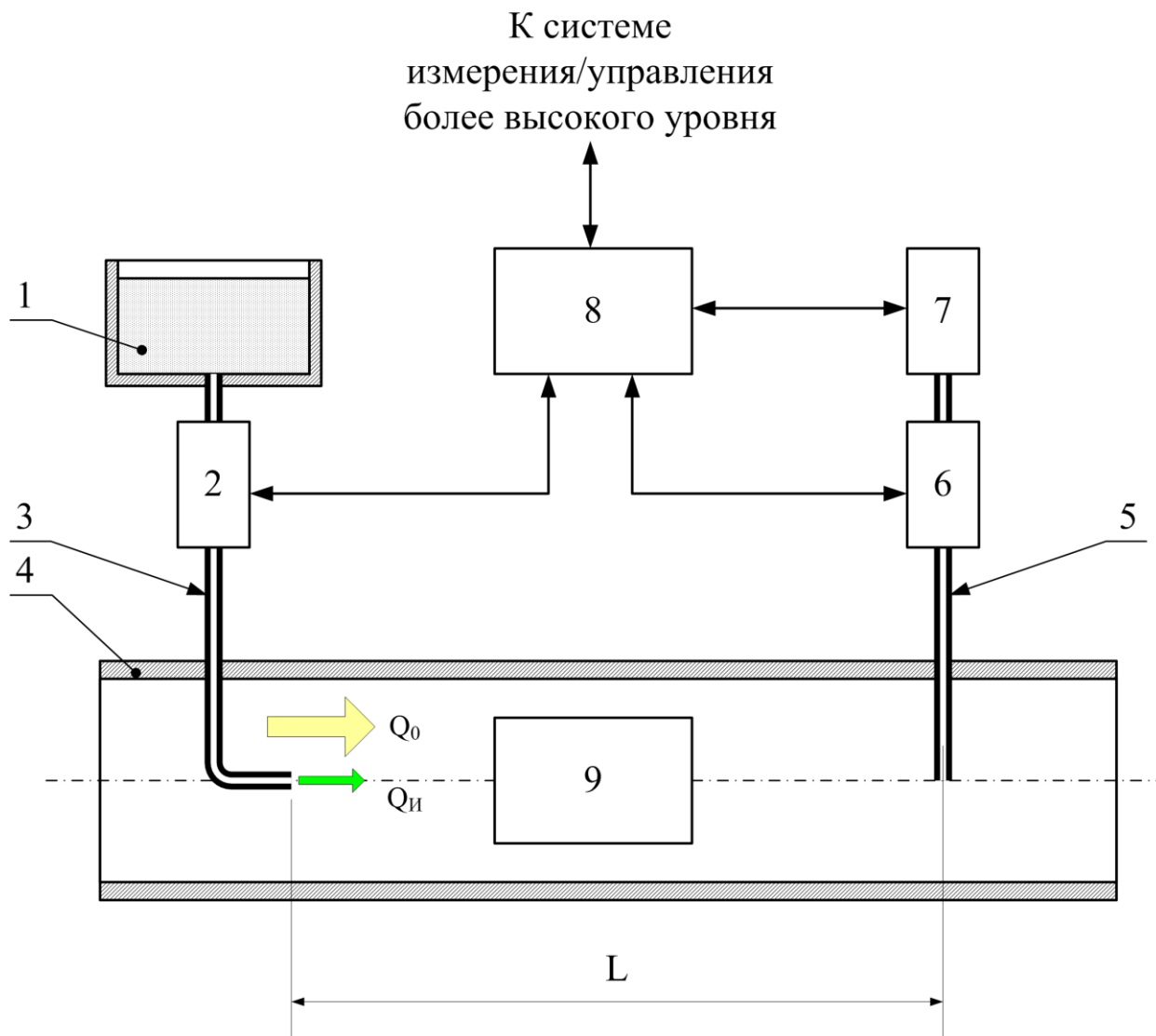


Рис. 16. Принципиальная схема работы концентрационного расходомера

## 9. МАССОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

В системах автоматического регулирования теплоэнергетических установок, в ракетной и авиационной технике, в различных химических процессах массовый расход  $Q_m$  является основным физическим параметром, определяющим оптимальные режимы работы объектов и качество процессов. В связи с этим в последнее время разрабатываются и внедряются различные приборы для измерения массового расхода [3].

Несмотря на многообразие предложенных принципиальных схем и конструктивных решений, массовые расходомеры прямого действия можно отнести к двум основным видам: силовым и тепловым. Принцип действия силовых расходомеров основан на том, что потоку измеряемого вещества сообщается до-

полнительное движение, чтобы создать в потоке инерционные эффекты, по которым судят о значении массового расхода.

На рис. 17 изображена принципиальная схема вибрационного кориолисова преобразователя расхода. Измеряемое вещество поступает по трубе 1, закрепленной в корпусе 2. Труба 3 связана гибким соединением с трубой 1. Это позволяет ей совершать колебательное движение под действием электромагнитной катушки возбуждения 4. При этом в потоке возникает кориолисово ускорение и соответствующая сила. Если ток возбуждения постоянный, то о массовом расходе можно судить по размаху колебаний  $\varphi$ , который уменьшается с его увеличением. Если поддерживать амплитуду колебания постоянной, расход можно оценивать по силе тока возбуждения.

Частный случай расходомера на эффекте Кориолиса – гироскопический расходомер, в котором преобразователь состоит из участка трубы в виде петли, которая вращается с постоянной угловой скоростью.

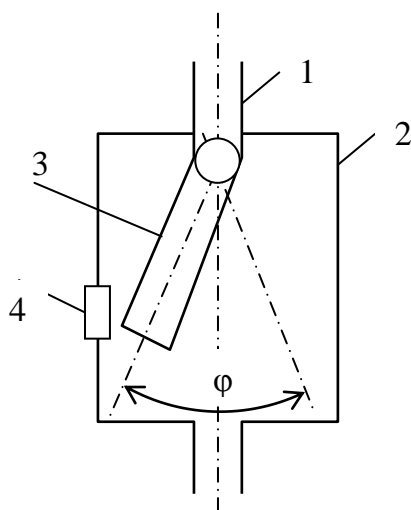


Рис. 17. Принципиальная схема вибрационного кориолисова преобразователя расхода

Турбосиловыми называют силовые расходомеры, в преобразователе которых поток закручивается электроприводом, либо пассивными крыльчатками, установленными в потоке. На рис. 18 изображен расходомер, состоящий из двух крыльчаток 1 и 2, связанных между собой пружиной 3. Углы наклона лопастей у крыльчаток разные. Это вызывает при движении потока закручивание пружины на угол, пропорциональный массовому расходу и появлению фазового сдвига на выходе тахометрических преобразователей 4 и 5.

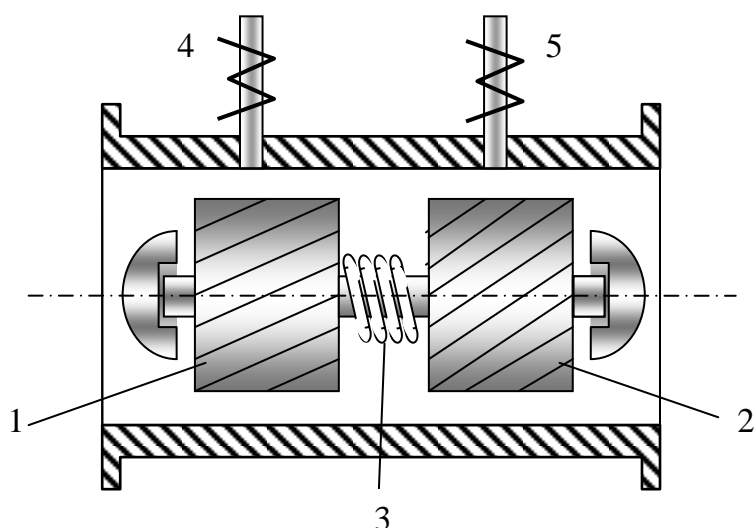


Рис. 18. Вариант конструкции турбосилового преобразователя расхода

Принцип действия тепловых расходомеров основан на непрерывном нагреве потока (калориметрические расходомеры) или специального элемента, помещенного в поток (термоанемометры).

У калориметрических расходомеров измеряется разность температур газа или жидкости при постоянной мощности нагрева или же мощность при постоянной разности температур (рис. 19). У термоанемометров измеряется сопротивление нагреваемого тела при постоянной силе тока или же сила тока при постоянном сопротивлении.

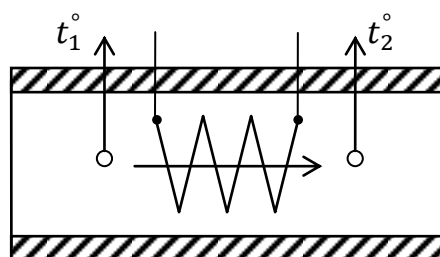


Рис. 19. Принцип работы калориметрического преобразователя расхода

Отметим основные свойства и области применения массовых расходомеров.

Кориолисовы расходомеры (в том числе и гироскопические) отличаются высокой точностью измерений (погрешность может составлять не более 0,05% по массе), большим диапазоном измерений. При их монтаже не требуются прямолинейные участки трубопровода до и после расходомера. Основным достоинством данных расходомеров является возможность их применения для измерения расхода многофазных сред. Так, например, эти расходомеры используются для измерения расхода нефтегазовых смесей [4].

Турбосиловые расходомеры отличаются большей компактностью. Для средних и больших расходов турбосиловые расходомеры являются единственно применяемыми из всей группы силовых расходомеров. Максимальные расходы

жидкости у них составляют 6–300 т/ч при диаметрах труб 50–200 мм. Их погрешность может составлять не более  $\pm (0,5-2)\%$  от предела шкалы. Общий недостаток силовых расходомеров – сложность конструкции, высокая стоимость.

К достоинствам термоанемометров относятся большой диапазон измеряемых скоростей, начиная от весьма малых, и высокое быстродействие, позволяющее измерять скорости, изменяющиеся с частотой до кГц.

Тепловые расходомеры могут применяться при измерении небольших расходов практически любых сред с неизменными теплофизическими свойствами, в том числе для измерения расхода очень вязких материалов.

## 10. РАСХОДОМЕРЫ ПОСТОЯННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Расходомеры постоянного перепада давления основаны на измерении вертикального перемещения чувствительного элемента. Это перемещение зависит от расхода среды и приводит к изменению площади проходного сечения расходомера. При этом перепад давлений на чувствительный элемент остается практически постоянным. Противодействующей силой в расходомерах этого вида является сила тяжести чувствительного элемента.

К приборам постоянного перепада давления относятся ротаметры, поршневые и поплавковые расходомеры. Отметим, что поршневые и поплавковые расходомеры широкого распространения не получили.

Ротаметр (рис. 20) в простейшем виде состоит из вертикальной конусной стеклянной трубки 1, внутри которой находится чувствительный элемент 2, выполненный в виде поплавка. Иногда его верхний обод снабжают наклонными канавками. Под действием потока жидкости или газа поплавок перемещается вертикально и одновременно приходит во вращательное движение и центрируется в середине потока. На поверхности конусной стеклянной трубки нанесена шкала. По положению поплавка относительно шкалы определяют объемный расход.

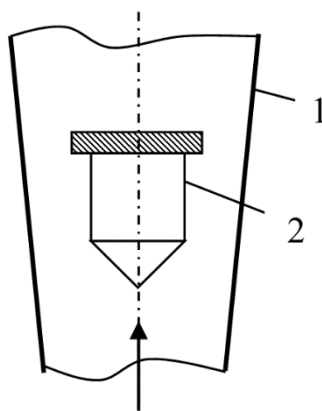


Рис. 20. Конструкция и принцип действия варианта расходомера постоянного перепада давления – ротаметра

К достоинствам ротаметров можно отнести простоту устройства и эксплуатации, наглядность показаний, надежность в работе. Приведенная погрешность обычно находится в пределах  $\pm(1 \div 2,5)\%$ . Ротаметры со стеклянной конусной трубкой применяются для измерения расхода газов или прозрачных жидкостей, находящихся под давлением не более 0,6 МПа.

В качестве недостатков таких ротаметров можно отметить хрупкость, неприменимость при значительных давлениях, только показывающий характер прибора (отсутствие дистанционной передачи показаний). Эти недостатки могут быть устранены при использовании конусной трубки из металла и применения дистанционной передачи. Однако при этом теряются простота устройства, наглядность показаний, а также резко сокращается ход поплавка.

## 11. КАЛИБРОВКА И ПОВЕРКА РАСХОДОМЕРОВ

Как любое средство измерения приборы для измерения расхода должны подтверждать свои метрологические характеристики методами калибровки и поверки.

**Калибровка средства измерений (СИ)** – совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений. Калибровка измерительных приборов заключается в установлении зависимости между показаниями прибора и размером измеряемой (входной) величины. Под калибровкой часто понимают процесс подстройки показаний выходной величины или индикации измерительного инструмента до достижения согласования между эталонной величиной на входе и результатом на выходе (с учётом оговоренной точности). Например, калибровкой прибора расхода, при истинном расходе в трубопроводе 10,5 л/мин результате на его отображающем устройстве 10,2 л/мин будет добавление 0,3 л/мин. При этом неважно, будет ли эта величина внесена в память прибора или зарегистрирована в печатном паспорте прибора.

Калибровка СИ производится преимущественно метрологическими службами юридических лиц с использованием эталонов, соподчинённых государственным эталонам единиц величин. В России калибровочная деятельность регламентирована Законом РФ «Об обеспечении единства измерений» и многими другими подзаконными актами.

**Поверка средств измерений** – совокупность операций, выполняемых органами Государственной метрологической службы (другими уполномоченными на то органами, организациями) с целью определения и подтверждения соответствия характеристик средства измерения установленным требованиям. В России поверочная деятельность в отношении подпадающих под Государственный Метрологический Надзор средств измерения регламентирована Законом Правительства Российской Федерации от 26 июня 2008 года № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» и подзаконными актами. Этими документами поверка определяется как «совокупность операций, выполняемых в целях

подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям».

Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации установлены следующие виды поверки:

- первичная поверка – поверка, выполняемая при выпуске средства измерений из производства или после ремонта, а также при ввозе средства измерений из-за границы партиями, при продаже;
- периодическая поверка – поверка средств измерений, находящихся в эксплуатации или на хранении, выполняемая через установленные межповерочные интервалы времени;
- внеочередная поверка – поверка средства измерений, проводимая до наступления срока его очередной периодической поверки;
- инспекционная поверка – поверка, проводимая органом государственной метрологической службы при проведении государственного надзора за состоянием и применением средств измерений;
- комплектная поверка – поверка, при которой определяют метрологические характеристики средства измерений, присущие ему как единому целому;
- поэлементная поверка – поверка, при которой значения метрологических характеристик средств измерений устанавливаются по метрологическим характеристикам его элементов или частей;
- выборочная поверка – поверка группы средств измерений, отобранных из партии случайным образом, по результатам которой судят о пригодности всей партии;
- экспертная поверка – проводится при возникновении разногласий по вопросам, относящимся к метрологическим характеристикам, исправности средств измерений и пригодности их к применению.

Метрологические службы на предприятиях и в организациях в процессе производства проводят метрологический контроль и надзор за средствами измерений путем:

- калибровки средств измерений;
- надзора за состоянием и применением средств измерений, с соблюдением метрологических правил и норм, а также нормативных документов по обеспечению единств измерений;
- поверки своевременности предоставления средств измерений на поверку и калибровку;
- выдачи обязательных предписаний, направленных на предотвращение, прекращение или устранение нарушений метрологических норм и правил;
- проведения метрологической экспертизы конструкторской и технологической документации и др.

Для приборов расхода несжимаемых жидкостей нормируются следующие метрологические характеристики:

**Номинальная статическая характеристика** преобразования расходомера, т.е. зависимость величины выходного сигнала от расхода для стационарных

режимов. В процессе калибровки нормируют вид аппроксимирующего уравнения, устанавливающего зависимость между расходом и информативным параметром выходного сигнала. Общий вид аппроксимирующего уравнения может быть представлен в следующих видах:

$$Q = ax^2 + bx + c, \quad Q = a + bx, \quad Q = bx.$$

Величины коэффициентов и конкретный вид уравнения определяются в процессе испытания «Градуировка».

### **Диапазон измерений расходомера**

Нормируют (определяют) нижний  $Q_{min}$  и верхний  $Q_{max}$  пределы измерений расхода, определяемые по результатам испытаний. При типовом нормировании за нижний предел измерений расхода принимают наибольшее в выборке значение, округленное до ближайшего большего члена ряда R20 по ГОСТ 8032-84, за верхний предел измерений расхода принимают наименьшее в выборке значение, округленное до ближайшего меньшего члена ряда R20 по ГОСТ 8032-84.

### **Информативный параметр выходного сигнала**

Нормируют физическую величину (характер выходного сигнала), нижнюю  $X_{min}$  и верхнюю  $X_{max}$  границы ее изменения. Обычно типом выходной физической величины у расходомеров являются один (или несколько) из следующих вариантов:

- средняя частота следования электрических импульсов;
- напряжение;
- сила тока;
- цифровой выходной код;
- перемещение указателя шкалы.

### **Характеристика систематической составляющей погрешности**

В процессе испытаний нормируют предел систематической составляющей погрешности, оцениваемый по результатам градуировки расходомера. При типовом нормировании оценкой систематической составляющей погрешности служит верхняя граница ее изменений  $\delta_B(\Delta_c)$ , определенная по совокупности индивидуальных значений  $\delta_j(\Delta_c)$ , где  $j$  – порядковый номер элемента выборки.

### **Характеристика случайной составляющей погрешности**

В процессе испытаний нормируют среднее квадратическое отклонение и функцию распределения случайной составляющей погрешности, оцениваемые по результатам испытаний. При типовом нормировании оценкой среднего квадратического отклонения является ее верхняя граница  $\sigma_B(\hat{\Delta})$ . При этом оценивают вероятность  $P(\hat{\Delta})$ , с которой среднее квадратическое отклонение лежит в пределах от математического ожидания  $M[\sigma_B(\hat{\Delta})]$  до верхней границы.

### **Характеристики основной погрешности**

В процессе испытаний нормируют предел основной погрешности, оцениваемый по результатам измерений. При типовом нормировании оценкой основной погрешности служит ее верхняя граница  $\delta_B(\Delta)$  в выборке. Определяют ве-

роятность  $P(\Delta)$ , с которой основная погрешность лежит в пределах от математического ожидания  $M[\sigma(\Delta)]$  до  $\delta_B(\Delta)$ .

### **Воздействие расходомера на поток**

Нормируют гидравлическое сопротивление первичного преобразователя расходомера  $\Delta_P$ , оцениваемое по результатам испытания «Оценка воздействия на поток». При типовом нормировании оценками гидравлического сопротивления служат номинальная  $\Delta_{P \text{ ном}} = \varphi_{\text{ном}}(Re)$  и предельная  $\Delta_{P \text{ max}} = \varphi_{\text{max}}(Re)$  функции воздействия расходомера на поток (где  $Re$  – число Рейнольдса), определяемые по совокупности индивидуальных оценок гидравлического сопротивления в выборке.

### **Динамическая характеристика**

Нормируют время установления показаний  $\tau_y$ , оцениваемое по результатам испытания "Оценка инерционности". При типовом нормировании оценивают среднее в выборке значение времени установления показаний  $\tau_{y, \text{cp}}$ , верхнюю  $\tau_{y, \text{в}}$  и нижнюю  $\tau_{y, \text{н}}$  границы его изменения.

### **Функции влияния**

В зависимости от степени внешних условий в некоторых случаях требуется нормировать (определять) функции влияния  $\psi_i(\xi_i)$ , где  $\xi_i$  – влияющая величина. Функции влияния, как правило, представляют в виде таблицы, где указывают наименование, символ, единицы измерения, числовые характеристики области исходных значений и границ изменения каждой влияющей величины  $\xi_i$ , а также уравнения номинальной и предельной функций влияния с числовыми значениями коэффициентов указанием единиц измерения функции.

### **Метрологическая надежность**

В зависимости от типа и конструктивных особенностей расходомера нормируют межповерочный интервал  $\tau_{\text{мп}}$ , представляющий собой время метрологически безотказной работы расходомера. Межповерочный интервал также зависит от режима эксплуатации и значений допускаемой основной погрешности.

Градуировка средств измерений – метрологическая операция, при помощи которой средство измерений (измерительный прибор) снабжают шкалой или градуировочной таблицей (кривой). Отметки шкалы должны с требуемой точностью соответствовать значениям измеряемой величины, а таблица (кривая) с требуемой точностью отражать связь эффекта на выходе прибора с величиной, подводимой ко входу. Градуировка производится с помощью более точных, чем градуируемые, средств измерений, по показаниям которых устанавливают действительные значения измеряемой величины. Применительно к приборам измерения расхода градуировка как отдельное, законченное испытание входит в состав всех видов испытаний. Кроме того, как операция контроля изменения характеристики преобразования расходомера градуировка может входить составной частью в испытания по оценке надежности и остаточных влияний внешних воздействий. Градуировка (с некоторыми технологическими особенностями) осуществляется также при оценке функций влияния (внешних факторов).



При массовом производстве расходомеров наиболее удобным оказывается градуировка, выполняемая методом сличения на специальных установках сличения (УС), требующих значительно меньших затрат на сооружение и проведение профилактических работ.

Специальным устройством УС воспроизводится или имитируется расход  $Q_{Bj}$ , который одновременно воздействует на **испытываемый** и **образцовый** расходомеры в течении времени  $\tau_{\Sigma}$  (участок АЕ на рис. 21). Измерения производят после выхода установки на требуемый режим формирования расхода (участок АВ, рис. 21) и стабилизации расхода (участок ВС, рис. 21). На участке CD квазиустановившегося расхода (общая длительность  $\tau_y$ ) формируются интервалы измерения  $\tau_{и1}, \tau_{и2}, \dots, \tau_{ин}$ , которые следуют с частотой  $f_0 = 1/\tau_0$ , где  $\tau_0$  – период времени между опросами. По окончании последнего интервала измерения поток останавливают или прекращают имитирующие расход движения (участок DE, рис. 21). В процессе воспроизведения серии различных расходов  $Q_{Bj}$  на регистратор установки сличения поступают три вида измерительной информации: выходные сигналы испытываемого расходомера  $X_{и}(t)$ , сигналы образцового расходомера  $X_0(t)$  и метки времени  $t$ .

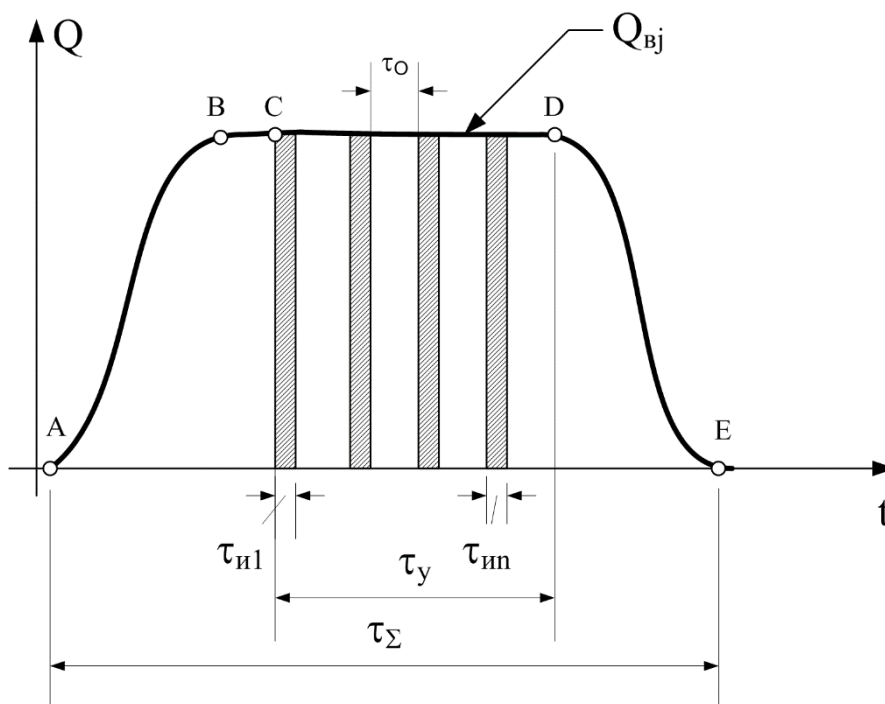


Рис. 21. Циклограмма воспроизведения заданного расхода  $Q_{Bj}$  и интервалов измерения на установке сличения

На рис. 22 показана структура установки сличения для проведения градуировки.

Вычислительно-управляющее устройство формирует команды на устройство воспроизведения расхода, генератор меток времени и устройство сбора измерительной информации для организации процесса измерения на  $j$ -м номинальном расходе  $Q_{Bj}$ , последовательно выполняя измерения для всех требу-

мых значений расхода и выполняя обработку полученных в результате измерений первичных градуировочных данных.

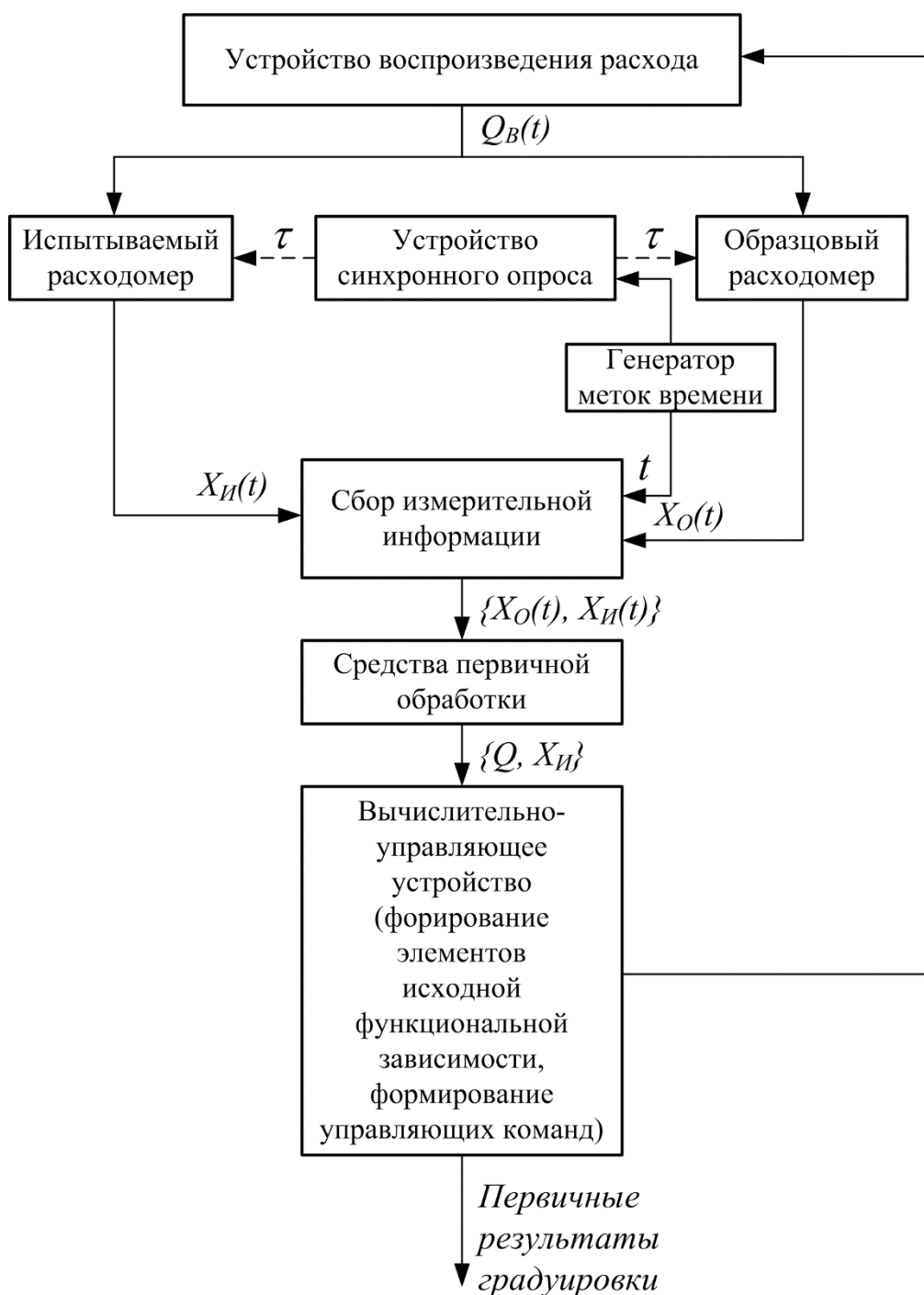


Рис. 22. Схема формирования первичных результатов градуировки на установке сличения

Первичная обработка, прежде всего, состоит в определении среднеинтегральных значений выходных сигналов испытываемого и образцового расходомеров:

$$X_{Иj} = \frac{1}{\tau_{ji}} \int_0^{\tau_{ji}} X_{И}(t) dt; \quad (14)$$

$$X_{Oj} = \frac{1}{\tau_{ji}} \int_0^{\tau_{ji}} X_{O}(t) dt; \quad (15)$$

Результат измерения  $X_{Иj}$  (14) направляется непосредственно в память вычислительно-управляющего устройства, а результат  $X_{Oj}$  (15) подвергается промежуточным преобразованиям в целях установления значения измеряемого расхода  $Q$ . Таким образом, формируется совокупность точек  $\{Q_j, X_{Иj}\}$ , которая может быть использована напрямую, либо как источник информации для построения аппроксимирующей зависимости номинальной статической характеристики.

## 12. ВЫХОДНЫЕ СИГНАЛЫ И ИНТЕРФЕЙСЫ РАСХОДОМЕРОВ

Приборы измерения расхода, как и многие другие современные измерительные средства, позволяют осуществлять считывание значения измеряемой величины непосредственно с устройств индикации (шкалы стрелочных приборов, цифровые и алфавитно-цифровые дисплеи, единичные индикаторы превышения пороговых или аварийных значений), так и осуществлять передачу мгновенного (или каким-либо образом преобразованного, например, интегрального) значения измеряемого расхода в виде сигнала по каналам связи. Необходимость данного решения очевидна – требуется все больше точек измерения расхода как для осуществления и оптимизации основных технологических процессов, так и для общетехнического и коммерческого учета. С учетом территориальной распределенности трубопроводов, потребности максимально оперативно корректировать отклонения значений параметров технологического процесса от их требуемых значений, необходимо обеспечивать время (темп) передачи информации с расходомеров не более определенных значений, сохраняя при этом «информационную точность» (отсутствие искажений) сигнала.

Расходомеры любого функционального в качестве выходного сигнала могут иметь один или несколько из нижеперечисленных:

1. Непрерывный выходной сигнал, пропорциональный измеряемому расходу. В качестве непрерывного выходного сигнала наиболее часто используют электрический ток или электрическое напряжение, величины которых находятся в определенном диапазоне.

2. Импульсная выходная последовательность, период или частота которой пропорциональны измеряемому расходу. При работе с выходным сигналом данного типа фактическое значение расхода поступает в систему измерения или систему управления более высокого уровня дискретно по времени.

3. Цифровой код, каждое значение которого из диапазона возможных значений соответствует определенному расходу. Информация от расходомера с

цифровым кодовым выходным сигналам в систему измерения более высокого уровня поступают дискретно как по времени, так и по уровню.

### 12.1. Расходомеры с непрерывным выходным сигналом в виде электрического напряжения или тока

Информационный выходной сигнал в виде электрического напряжения или тока наиболее удобно передавать на большие расстояния при передаче данных в централизованные измерительные системы. В целях упрощения алгоритмов на стороне приема информационного сигнала, вся первичная и последующая обработка данных о расходе (коррекция по таблицам тарифов, учет внешних факторов) выполняется в измерительно-управляющем блоке расходомера, тогда выходной сигнал будет прямо пропорционален расходу, т.е.:

$$I_{\text{ВЫХ}}(t) = k_I \cdot Q(t) + b_I \quad (16)$$

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = k_U \cdot Q(t) + b_U \quad (17)$$

где  $k_I, k_U$  – коэффициенты преобразования измеренного расхода в ток (напряжение) соответственно;

$b_I, b_U$  – аддитивная составляющая выходного сигнала (требуется в ряде случаев);

$Q(t)$  – величина мгновенного расхода, измеренного расходомером

$I_{\text{ВЫХ}}(t)$  – величина выходного тока в цепи «расходомер»-«устройство приема информации»

$U_{\text{ВЫХ}}(t)$  – величина выходного напряжения на клеммах расходомера (и, в идеальном случае, на клеммах устройства приема информации)

В целях унификации общепромышленных систем измерения и управления выходные сигналы измерительных устройств нормируют в определенный диапазон. Для выходного сигнала в виде напряжения такими нормированными диапазонами являются:  $\pm 1$  В,  $\pm 5$  В,  $\pm 10$  В, 0–5 В, 0–10 В.

Для повышения надежности передачи и помехозащищенности сигналов при их передаче по информационному каналу более часто применяют аналоговый выходной сигнал в виде электрического тока, так называемый интерфейс «токовая петля» (рис. 23).

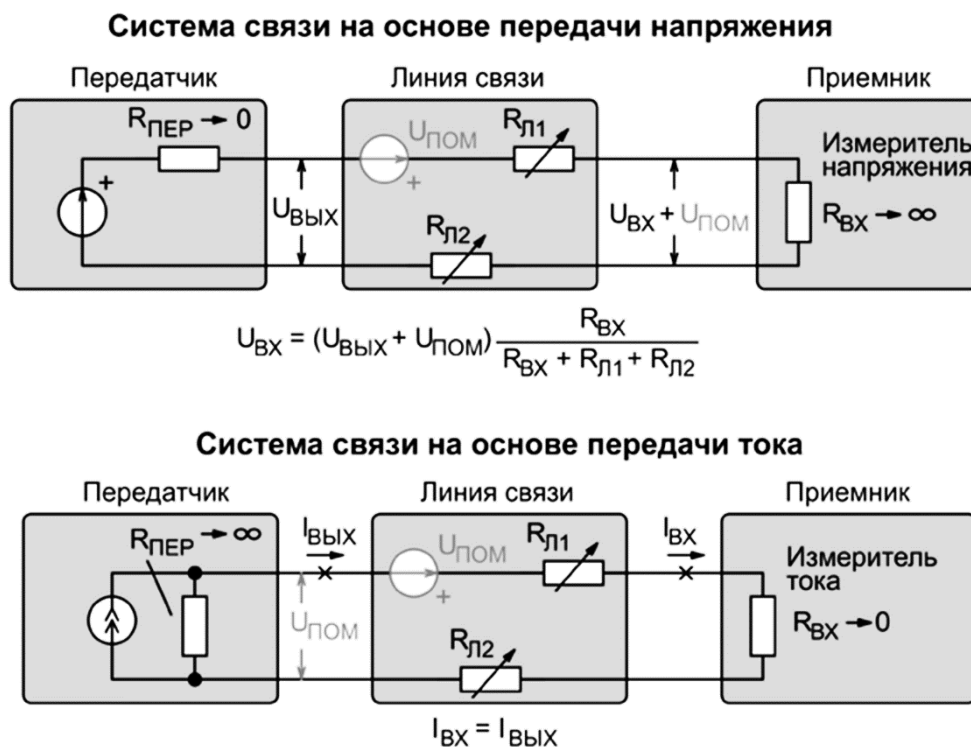


Рис. 23. Измерительные системы с передатчиком-расходомером, линией связи и измерителем-приемником информации

В отличие от напряжения, величина которого отличается для каждого участка, ток во всех элементах неразветвленной электрической цепи одинаков. Это означает, что качество передаваемой информации (силу тока) можно контролировать не только на приемной, но и на передающей стороне, тем самым подстраиваясь под все изменения параметров линии. Таким образом, система передачи данных на основе токовой петли не требует каких-либо дополнительных инструментов калибровки или автоподстройки под конкретную линию связи – эту функцию автоматически выполняет передатчик.

Влияние параметров линии связи в системе, передающей информацию с помощью напряжения, теоретически можно уменьшить, увеличив внутреннее сопротивление приемника (в идеальном случае  $R \Rightarrow \infty$ ). В этом случае произойдет уменьшение тока в линии, а, следовательно, и падение напряжения на сопротивлениях  $R_{Л1}$  и  $R_{Л2}$ . Однако при работе с длинными линиями это приведет к ухудшению качества связи, поскольку кроме сигнала в системе существуют еще и помехи.

Для выходного сигнала в виде электрического тока нормированными диапазонами являются: 0–20 мА, 4–20 мА,  $\pm 20$  мА. Среди данных диапазонов наиболее распространенным является 4–20 мА.

В основе интерфейса 4–20 мА лежит токовая петля с рабочими значениями токов в диапазоне 4...20 мА. Изменение значения тока до значения менее 3,8 мА свидетельствует об обрыве линии, а выше 20,5 мА – о коротком замыка-

нии. Таким образом, этот интерфейс позволяет контролировать целостность физических соединений в системе.

Основными преимуществами интерфейса 4–20 мА являются:

- простота – в самом простейшем случае удаленное устройство можно подключить с помощью всего двух проводов;
- высокая точность передачи сигнала – поскольку ток одинаков во всех элементах системы передачи, передатчик всегда знает, какой уровень сигнала получит приемник;
- высокая помехозащищенность за счет двойного контроля тока (и на стороне передачи, и на стороне приема), позволяющая подключать удаленные (порой до десятков километров) объекты, например, с помощью стандартных телефонных линий;
- независимость качества связи от длины линии, которая влияет только на максимальную скорость передачи данных;
- возможность самодиагностики как обрыва, так и короткого замыкания линии;
- теоретически неограниченная дальность связи – фактически максимальная длина соединительного кабеля ограничена лишь электрической прочностью его изоляции и скоростью передачи данных.

К недостаткам данного интерфейса можно отнести: возможность передачи по линии связи только одного сигнала, а также ограничение скорости передачи (при использовании данной линии в качестве основы передачи цифрового сигнала).

## **12.2. Расходомеры с выходным сигналом «импульсная последовательность»**

В расходомерах с выходным сигналом данного типа информативным параметром являются время (период) между импульсами либо обратная величина – частота импульсной последовательности. Как правило, при увеличении расхода частота импульсной последовательности пропорционально увеличивается (период уменьшается). Пример выходного сигнала изображен на рис. 24.

Физическим сигналом импульсной последовательности может быть как электрическое напряжение (как изображено на рис. 24), так и электрический ток («есть/нет напряжение/ток»). В ряде случаев выходным сигналом может быть состояние электрического контакта («контакт замкнут / контакт разомкнут»), в качестве которого может выступать электромагнитный геркон, контакт электромеханического реле или полупроводниковый биполярный либо полевой транзистор, работающий в ключевом режиме и включенный по схеме «открытый коллектор» или «открытый исток». В данных случаях параметры электрических сигналов определяются не выходными электрическими или электронными схемами расходомера, а режимами внешней по отношению к расходомеру электрической цепи (обычно со стороны приемника информации).

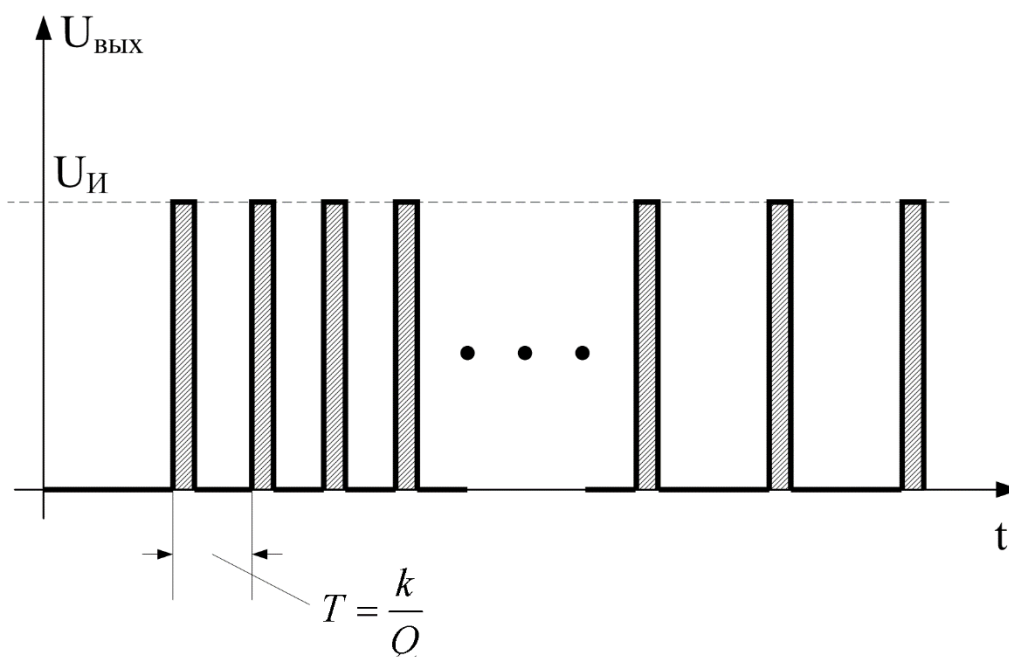


Рис. 24. Пример импульсной последовательности (выходного сигнала) расходомера

### 12.3. Расходомеры с цифровым выходным кодом

В связи со все более широким внедрением цифровых систем в добывающей и перерабатывающей промышленности, машиностроении, жилищно-коммунальном хозяйстве, других сферах деятельности, датчики и измерительные средства (приборы) в большой степени оснащены встроенными микропроцессорными (микроконтроллерными) системами измерения первичных сигналов, их преобразования и передачи обработанной информации системам верхнего уровня.

В таких приборах информация об измеряемой или измеряемых физических величинах хранится и передается в виде цифрового кода (наиболее часто – в виде двоичного кода) – в виде 8-, 16-, 32-разрядных двоичных слов. Помимо собственно измеряемой информации вычислительное устройство обеспечивает хранение дополнительной метрологической (статическая характеристика преобразователя, аппроксимирующие и поправочные коэффициенты, зависимости расхода от влияющих параметров и т. д.) и неметрологической информации (заводской номер прибора, дата выпуска, даты поверок и т. д.). С целью информационного обмена данной информацией (период обращения к которой может быть принципиально различающимся) в состав вычислительного устройства вводятся интерфейсы цифрового обмена. Как правило, это последовательные цифровые шины, многоразрядная информация по которым передается в виде отдельных битов данных (поразрядно) с течением времени. Применение последовательного принципа передачи данных позволяет существенно сократить количество соединительных проводников в интерфейсе, а сохранение пропускной способности информационного канала обеспечивается повышением скорости (в

битах/секунду), повышением и исполнением требований к кабельным линиям связи (емкость, волновое сопротивление и т. д.).

В современных расходомерах нашли широкое применение следующие последовательные интерфейсы: EIA RS-485, EIA RS-422, CAN, HART [7].

На примере последовательного интерфейса RS-485 рассмотрим работу распределенного измерительного комплекса (рис. 25). Интерфейс RS-485 (как и все вышеперечисленные) относится к классу промышленных последовательных интерфейсов, обеспечивающих двухсторонний информационный обмен по кабелю типа «витая пара» (два скрученных медных проводника, обеспечивающих высокую помехозащищенность от наведенных электромагнитных помех). Показанный на рис. 25 и применяемый во многих промышленных интерфейсах способ подключения носит название «шина», поскольку к одной последовательно проложенной от устройства к устройству кабельной линии может быть подключено до нескольких десятков устройств (до 32 для интерфейса RS-485). Как правило, измерительные преобразователи (в том числе расходомеры) являются пассивными абонентами, подключенными к шине в режиме приема данных. Устройство более высокого уровня (промышленный логический контроллер, персональный компьютер и т. д.) выступает в роли активного устройства, т.е. в режиме поочередного опроса осуществляет передачу команд, управляющих слов, слов данных конкретному устройству-приемнику. Поскольку все устройства одновременно «прослушивают» линию, требуется введение способа адресации устройств, что, как правило, реализуется программным образом на уровне протоколов обмена (т.е. организацией определенного порядка следования слов, введением в пакеты информационного обмена заголовочных байтов, байтов адреса, байтов проверочных сумм и т. д.). В таком случае каждое устройство на шине имеет свой логический адрес и осуществляет ответ на запросы активного устройства только на пакеты с совпадающим адресом. Для разделения передаваемой и принимаемой информации на категории в пакет запроса вводятся слова (байты), идентифицирующие какого рода информация будет передаваться в расходомер или запрашиваться от него.

К преимуществам последовательных интерфейсов в целом (и интерфейса RS – 485 в частности) можно отнести: одновременное подключение нескольких абонентов (до 32 для интерфейса RS-485), достаточно большую длину сегмента линии связи (до 1200 м для интерфейса RS-485), скорость передачи до 10 Мбит/с (для интерфейса RS-485), что выполняется для сегментов длиной не более 100 м (для длины 1200 м достижимая скорость составляет 38400 бит/с).



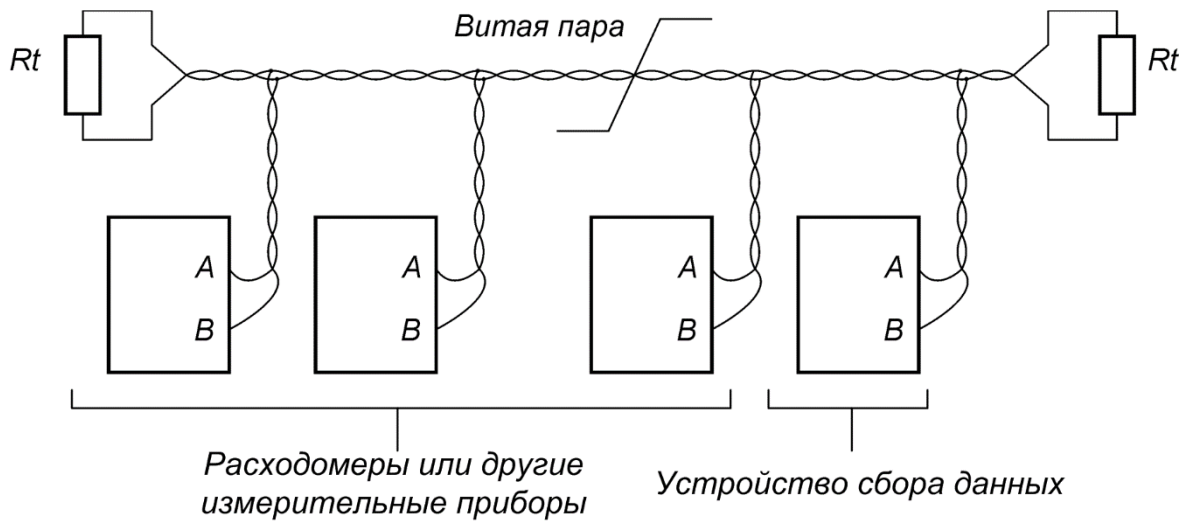


Рис. 25. Схема подключения приемо-передатчиков устройств к магистрали последовательного интерфейса RS-485

К недостаткам последовательных интерфейсов можно отнести: достаточно большое потребление энергии, возможность возникновения коллизий на уровне физических сигналов (при попытке двух устройств одновременно передавать данные), возможность «потери» определенной доли устройств (и информации соответственно) при обрыве линии, необходимость аппаратной или программной реализации логического протокола обмена на шине, что усложняет аппаратную или программную реализацию блоков электроники расходомера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Номенклатура приборов для измерения расхода очень велика. Расходомеры переменного перепада давления, несмотря на малый диапазон измерения расхода, широко применяются в промышленных установках, работающих в номинальном режиме. Меточные расходомеры применяют не в качестве эксплуатационных приборов для непрерывного измерения, а для различных лабораторных и исследовательских работ, и в частности при градуировке и поверке других расходомеров.

В настоящее время для технического и коммерческого учета материальных и энергетических ресурсов чаще всего применяют ультразвуковые (акустические), электромагнитные, вихревые и кориолисовы расходомеры [5]. Учитывая многообразие измеряемых сред и возникающих измерительных задач, выбор подходящего по своим характеристикам измерителя расхода является достаточно сложной задачей. К основным критериям выбора типа измерителя расхода относятся:

1. Характеристики измеряемой среды (физико-химические свойства).
2. Необходимость измерения массового расхода.
3. Динамический диапазон измерения.
4. Точность измерения, межповерочный интервал и наличие возможности поверки расходомера без его демонтажа.
5. Надежность, эксплуатационные характеристики.

Физико-химические свойства измеряемой среды играют определяющее значение при выборе метода измерения расхода и конструктивного исполнения расходомера.

Электромагнитные расходомеры предназначены только для измерения электропроводящих жидкостей, растворов и пульпы. При выборе конкретной модификации электромагнитного расходомера особое внимание нужно уделить материалу футеровки измерительной части, так как именно от нее зависит температурная и коррозионная стойкость измерительной части датчика.

Вихревые расходомеры являются самыми универсальными в плане измеряемых сред. Расход холодных и горячих жидкостей, независимо от их электропроводящих свойств, насыщенного и перегретого пара, природного и технических газов может быть измерен с помощью расходомеров данного типа.

Ультразвуковые расходомеры имеют наиболее широкий диапазон применения по температуре и давлению измеряемой среды.

Кориолисовы расходомеры используются для измерения массового расхода жидкостей, в том числе жидкостей с включением твердых компонентов и растворенных газов. Наибольшее применение расходомеры данного типа получили для измерения расхода и дозирования коррозионно-активных веществ, топлива и сжиженных углеводородных газов.

Для удобства выбора типа расходомера в зависимости от физико-химических свойств среды и измерительной задачи, все данные по рассмотренным выше методам измерения, сведены в табл. 1.

Рабочие диапазоны расходомеров различного типа

Метод измерения расхода	Рабочая (измеряемая) среда	Диапазон температур, °С	Максимальное давление, МПа
Электромагнитный	Электропроводящие жидкости	–30...+180	16
Вихревой	Жидкости, газы	–40...+250	10
Ультразвуковой (врезные датчики)	Жидкости, газы	–200...+200	4
Ультразвуковой (накладные датчики)	Жидкости, газы	–40...+120	Нет ограничений
Кориолисовый	Жидкости, газы	–50...+180	40

В большинстве случаев величина расхода, которую требуется измерять, изменяется в довольно широких пределах. Отношение величины максимального к величине минимального расхода называется динамическим диапазоном измерения.

Необходимо также учитывать и то, что расходомер может оказывать определенное сопротивление движению измеряемой среды и вносить дополнительное гидравлическое сопротивление. Наибольшим гидравлическим сопротивлением обладает вихревой расходомер из-за наличия в измерительной части прибора тела обтекания довольно большого объема. Наименьшим гидравлическим сопротивлением обладают электромагнитные и ультразвуковые измерители расхода, так как они не имеют изгибов и частей, выступающих внутрь измерительной части. В табл. 2 приведены ориентировочные значения динамического диапазона измерения расхода и максимальные значения скорости потока для расходомеров различного принципа действия.

Таблица 2

Значения динамического диапазона расхода и максимальной скорости потока для различных типов расходомеров

Метод измерения расхода	Динамический диапазон	Максимальная скорость потока, м/с
Электромагнитный	100:1	10 (жидкость)
Вихревой	25:1	10 (жидкость), 80 (пар, газ)
Ультразвуковой	100:1	12 (жидкость), 40 (пар, газ)
Кориолисовый	100:1	10 (жидкость), 300 (пар)

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое расход вещества? Укажите основные и дополнительные единицы измерения расхода.
2. Какие преимущества дает оснащение расходомера интегратором?
3. Укажите сферы применения расходомеров.
4. Чем массовый расход отличается от объемного?
5. Следует ли учитывать температуру носителя (измеряемого вещества) при определении массового расхода?
6. Почему при измерении расхода необходимо учитывать фазовый состав измеряемого вещества?
7. Перечислите основные физико-химические свойства вещества, учитываемые при выборе метода измерения расхода.
8. Каковы основные технические требования, предъявляемые к расходомерам?
9. Как могут быть связаны диапазон измерения расходомера и его основная метрологическая погрешность?
10. Что такое быстродействие расходомера?
11. В чем заключается принцип действия расходомера переменного перепада давления?
12. Что такое сужающее устройство расходомера и какие их виды вы можете перечислить?
13. Какова приведенная погрешность расходомеров с сужающими устройствами?
14. Перечислите и опишите достоинства расходомеров с сужающими устройствами.
15. В чем отличие расходомеров с гидравлическим сопротивлением от расходомеров с сужающими устройствами и какова их сфера применения?
16. На чем основан принцип действия центробежных расходомеров?
17. На каком законе основан принцип действия электромагнитного расходомера?
18. Какие цели преследует импульсное питание магнитной системы электромагнитного расходомера?
19. Укажите сферы применения электромагнитных расходомеров и ограничения на их использование.
20. Каков может быть диапазон измерения электромагнитного расходомера?
21. Опишите принцип работы вихревого расходомера.
22. Что такое число Струхала?
23. Опишите способы преобразования вихревых колебаний в выходной сигнал.
24. В чем заключается особенность вихреакустического расходомера?
25. На чем основан принцип работы тахометрического расходомера?
26. Перечислите основные типы преобразователей сигнала тахометрического расходомера.
27. Каковы достоинства и недостатки тахометрических расходомеров?

28. Что является носителем информации и информативным параметром в акустических расходомерах?
29. Каков диапазон частот акустических колебаний ультразвуковых акустических расходомеров?
30. Каковы основные преимущества и недостатки акустических расходомеров?
31. На чем основан принцип действия меточных расходомеров?
32. Какова сфера применения меточных расходомеров? Чем вызвано ограничение их применения?
33. Перечислите основные типы меток, применяемых в меточных расходомерах.
34. Что является выходным информативным параметром о расходе в меточном расходомере?
35. Укажите погрешность (диапазон) меточного расходомера и от чего она зависит.
36. На чем основан действия корреляционного расходомера и в чем его отличие от меточного расходомера?
37. Перечислите и дайте краткую характеристику основных типов корреляционных расходомеров.
38. Каковы преимущества и недостатки концентрационных расходомеров?
39. Приведите уравнение баланса вещества-индикатора и формулу для определения основного расхода.
40. В чем отличие концентрационного расходомера непрерывного типа от концентрационного расхода залпового типа? Какой из них может дать более точные показания?
41. Опишите назначение и сферы применения массовых расходомеров.
42. Каковы два основных типа (по принципу действия) массовых расходомеров?
43. Каковы достоинства и недостатки кориолисовых и турбосиловых расходомеров?
44. Каково назначение и особенности расходомеров постоянного перепада давления? В чем заключается их принцип действия?
45. В чем заключается калибровка и поверка расходомеров?
46. Какие виды поверки применяются при производстве и эксплуатации расходомеров?
47. Что такое приведенная погрешность расходомера?
48. Что такое метрологическая точность расходомера?
49. Перечислите и сделайте краткое описание основных метрологических характеристик расходомеров?
50. Что такое межповерочный интервал расходомера?
51. Каков принцип проведения испытаний в установках сличения?
52. В чем заключается градуировка расходомера?
53. Какие основные типы выходного сигнала расходомера используются в настоящее время?
54. Что такое интерфейс обмена (применительно к расходомерам)?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 15528–86. Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа.
2. ГОСТ 8.407–80. Расходомеры несжимаемых жидкостей. Нормируемые метрологические характеристики.
3. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества: справочник/ П.П. Кремлевский. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 701 с.
4. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов»/ В.П. Преображенский. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
5. Руководство по выбору расходомера. Часть 1 – [https://rusautomation.ru/articles/rukovodstvo\\_po\\_vyboru\\_raskhodomera\\_chast\\_1\\_9251](https://rusautomation.ru/articles/rukovodstvo_po_vyboru_raskhodomera_chast_1_9251)
6. Бирюков, Б.В. Средства испытаний расходомеров / Б.В. Бирюков, М.А. Данилов, С.С. Квилаис. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.
7. Титаев, А.А. Промышленные сети: учеб. пособие/ А.А. Титаев. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 124 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Расходомеры переменного перепада давления .....	6
2. Электромагнитные расходомеры .....	9
3. Вихревые расходомеры .....	12
4. Тахометрические расходомеры .....	14
5. Акустические расходомеры .....	15
6. Меточные расходомеры.....	18
7. Корреляционные расходомеры .....	20
8. Концентрационные расходомеры .....	22
9. Массовые расходомеры .....	25
10. Расходомеры постоянного перепада давления.....	28
11. Калибровка и поверка расходомеров .....	29
12. Выходные сигналы и интерфейсы расходомеров .....	35
Заключение.....	42
Контрольные вопросы и задания .....	44
Библиографический список.....	46

*Учебное издание*

**Голощанов** Сергей Семенович,  
**Носиков** Максим Владимирович

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

Учебное пособие

Техн. редактор *А.В. Миних*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 10.06.2022. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 2,79. Тираж 50 экз. Заказ 192/358.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.