

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

С. М. Нубарян

СРЕДСТВА КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ

Курс лекций

(для студентов всех форм обучения и слушателей второго высшего образования по направлению подготовки 0921 (6.0060101) «Строительство», специальности 7.092108 (7.06010107), 8.092108 (8.06010107) «Теплогазоснабжение и вентиляция»)

ХАРЬКОВ – ХНАГХ – 2009

Нубарян С. М. Средства коммерческого учета энергоносителей: курс лекций (для студентов всех форм обучения и слушателей второго высшего образования по направлению подготовки 0921 (6.0060101) «Строительство», специальности 7.092108 (7.06010107), 8.092108 (8.06010107) «Теплогазоснабжение и вентиляция») / С. М. Нубарян; Харк. нац. акад. город. хоз-ва. – Х: ХНАГХ, 2009. – 152 с.

Рецензент: к.т.н. наук, проф. Б. И. Борзенков (ХНУРЭ)

В курсе лекций изложены основные сведения о средствах коммерческого учета энергоносителей в коммунальном хозяйстве и энергетике. Курс лекций содержит пять разделов, в которых отражены основные требования к системам коммерческого учета и проведена их классификация. Рассмотрены основные средства измерения и количества вещества. Особенное внимание уделено вопросу измерения расходов с помощью сужающих устройств, а также рассмотрены основные подходы и приборы, при измерении количества тепла.

Курс лекций построен по требованиям кредитно-модульной системы организации учебного процесса и согласован с ориентированной структурой содержания учебной дисциплины, рекомендованной Европейской Кредитно-трансферной Системой (ECTS).

Курс лекций предназначен для студентов всех форм обучения по специальности 7.092108, 8.092108 «Теплогазоснабжение и вентиляция».

Рассмотрено на заседании кафедры ЭГТС
протокол № 8 от 08.08.2008 г.

ВВЕДЕНИЕ

В качестве энергоносителей в промышленности и других отраслях народного хозяйства нашли широкое применение жидкие и газообразные среды. К ним относятся пар, газообразное и жидкое топливо, вода и др. С измерениями расхода энергоносителей приходится сталкиваться очень часто, что необходимо для контроля и управления технологическими процессами, а также при их учете и распределении.

При измерениях, связанных с учетом количества жидкости, газа и пара используются приборы (устройства), называемые расходомерами и счетчиками, которые по принципу действия аналогичны. По своей сути счетчики являются интеграторами расхода за определенный интервал времени, что и определяет их однотипность с расходомерами.

Расходомер - прибор, измеряющий количество вещества, проходящее через соответствующее сечение трубопровода в единицу времени.

Счетчик – прибор, измеряющий количество вещества, проходящее через заданное сечение трубопровода за определенный промежуток времени. При этом количество вещества определяется как разность двух последовательных показаний счетчика в конце и начале отсчетного временного интервала. В настоящее время для коммерческого учета энергоносителей используются расходомеры и расходомерные комплексы, в основе которых лежат технические средства, использующие различные принципы работы.

Использование того или иного типа расходомера обусловлено свойствами измеряемой среды, условиями эксплуатации, экономической целесообразностью и другими факторами.

Применение различных расходомеров для коммерческого учета энергоносителей и для технологических процессов выдвигает повышенные требования к их метрологическим и надежностным характеристикам. К таким

требованиям, в первую очередь, относятся высокая точность измерений, независимость показаний расходомеров от давления и температуры, расширение диапазонов измерения, повышение безотказности в работе и сроков службы. Рост указанных требований приводит к новым разработкам расходомерных устройств и счетчиков, а также использованию вычислительной техники при соответствующих измерениях.

Среди используемых расходомеров для коммерческого учета энергоносителей широкое применение получили средства переменного перепада давления, в основе которых лежат сужающие устройства. В настоящий момент времени для различных отраслей промышленности их доля составляет более 50% всего расходомерного парка. На основе этих приборов разработаны и совершенствуются многие современные измерительные микропроцессорные комплексы, которые позволяют повысить точность определения расхода и сравнительно просто учитывать влияние различных параметров измеряемых сред на результаты измерений.

Функционирование микропроцессорных расходомерных комплексов предполагает использование математических моделей, учитывающих изменение физико-химических свойств измеряемых сред, а также параметров, характеризующих сужающие устройства. Разработка и исследования подобных моделей проводилась во многих промышленно развитых странах мира, результаты которых нашли отражение в ряде отраслевых, государственных, а также международных руководящих и нормативных документов.

Данный курс лекций позволяет студентам освоить основные подходы, необходимые при систематизации технических средств для коммерческого учета энергоносителей, получить основные теоретические сведения о них и получить практические навыки по расчету сужающих устройств. Здесь приведены также необходимая справочная информация и контрольные вопросы в конце разделов для лучшего усвоения пройденного материала.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Целью осуществления коммерческого учета энергоносителей является определение количества энергоносителей, проходящих через каждого участника системы «поставщик-потребитель» для проведения взаимных расчетов. Поскольку проходящие объемы энергоносителей измеряются при различных условиях (температура, давление, плотность и т.д.), то зачастую возникает задача приведения измеренных объемов энергоносителя к единым, постоянным параметрам, что является обязательным условием для газообразных сред.

Центральными вопросами коммерческого учета энергоносителей являются достоверность учета и обеспечение совпадения результатов измерения на узлах учета поставщика и потребителя. Так, например, в системах газоснабжения приведенный к стандартным условиям объем газа, отпущенный поставщиком, должен быть равен сумме приведенных к стандартным условиям объемов газа, полученных всеми потребителями. Эта задача называется сведением балансов в пределах устойчивой структуры газораспределения.

Следует отметить различие, существующее между измерением расхода и количества, и их учетом. В отличие от результатов измерений, всегда содержащих погрешность, учет осуществляется между поставщиком и потребителем по взаимосогласованным правилам, обеспечивающим формирование значения количества энергоносителя в условиях, не содержащих никакой неопределенности.

Краеугольным моментом при коммерческом учете энергоносителей является наличие нормативной базы, в соответствии с которой все измерения, связанные с учетом энергоносителей, должны выполняться согласно аттестованным методикам выполнения измерений, а результаты этих измерений могут быть использованы только при условии, если известны соответствующие характеристики погрешностей измерений.

Не меньшее значение для организации учета энергоносителей имеет техническая база учета, т.е. наличие соответствующих технических средств учета, использующих различные методы измерений. Здесь следовало бы отметить, что учет энергоносителей обычно реализуется с помощью косвенных методов измерения, т.е. система учета состоит из нескольких отдельных, но различных измерительных преобразователей и приборов, каждый из которых выполняет свою функцию. Кроме точности отдельно взятых измерительных устройств, составляющих систему учета, важен конечный результат — точность учета энергоносителя, т.е. погрешность или неопределенность результата измерения расхода и количества энергоносителя, т.к. даже с высокоточными отдельными составляющими можно получить плохой результат.

Различают следующие виды контроля и учета:

1. *Коммерческий контроль и учет*, являющийся наиболее ответственным видом учета. Производится по правилам и документам, имеющим статус юридических норм, регулирующих взаимоотношения между поставщиком и покупателем.

2. *Хозрасчетный контроль и учет*, где учет осуществляется в рамках одного предприятия. Этот вид учета используется для разнесения затрат между подразделениями предприятия при определении себестоимости продукции.

3. *Оперативный контроль*, связанный с получением информации о величине расхода и количества, который используется в системах регулирования и управления технологическим процессом.

Важной особенностью учета расхода газа является понимание того, что смеси газов (в частности, природный газ) используются промышленностью в двух различных направлениях: сжигая природный газ, мы получаем тепло, а разлагая его на органические и неорганические составляющие - полупродукт, например аммиак, необходимый для производства удобрений или других полезных продуктов. В первом случае газ выступает как источник энергии, и здесь необходимо использовать его энергосодержание, определяемое через

теплотворную способность газа, а остальные компоненты являются балластом, например азот, водяной пар. Во втором случае полезным свойством природного газа является масса органических компонентов, т.к. именно эта часть природного газа используется для получения полезной продукции. Поэтому в понятии «расход» необходимо указывать на расход и количество определенных компонентов. Без указания свойств этих сред, состоящих из некоторого количества компонентов говорить о расходе, а, следовательно, и коммерческом учете бессмысленно.

1.1. Требования, предъявляемые к приборам коммерческого учета

Средства измерений, применяемые для коммерческого учета, должны быть внесены в государственный реестр, иметь действующие свидетельства о поверке и применяться в соответствии с требованиями технической документации.

Все средства измерений должны соответствовать требованиям действующих нормативных и руководящих документов по технической эксплуатации и безопасности применения этих средств.

В настоящее время к расходомерам и счетчикам предъявляется много требований, удовлетворить которым достаточно сложно. К требованиям на средства коммерческого учета энергоносителей относятся следующие:

1. *Высокая точность измерения* — одно из основных требований, предъявляемых к приборам учета газа. Если раньше погрешность измерения 2–2,5% считалась нормальной и достаточно удовлетворительной, то в настоящее время нередко требуется иметь погрешность не более 0,5–1%. Повышение точности достигается как за счет применения прогрессивных методов и приборов (ультразвуковых, вихревых и др.), так и за счет совершенствования старых классических методов.

Так, например, измерение расхода газа методом переменного перепада давления является единственным методом для измерения больших потоков

газа (до 36×10^4 м³/ч) и допускает погрешность измерения до 5% (ГОСТ 8.143-75). Снижение погрешности в расходомерах с сужающими устройствами достигается за счет применения износостойчивых диафрагм, нового поколения датчиков перепада, температуры, вычислительных комплексов для автоматического определения расхода с учетом температуры, давления, коэффициента сжимаемости.

2. *Надежность* — одно из главных требований, предъявляемых к расходомерам и счетчикам энергоносителей. 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. Приборы учета, узлы и детали которых в процессе измерения находятся в движении, имеют меньший срок службы, чем у расходомеров, работающих без движущихся частей.

3. *Независимость результатов измерения от изменения плотности вещества* - это требование особо важно при измерении расхода газа, плотность которого сильно зависит от давления и температуры. В большинстве случаев необходимо иметь устройства, автоматически корректирующие показания приборов при изменении температуры или давления измеряемого газа.

4. *Быстродействие прибора*, определяемое его хорошими динамическими характеристиками, которое необходимо, прежде всего, при измерении быстро меняющихся расходов, а также в случаях применения приборов учета в системах автоматического регулирования. Быстродействие большинства расходомеров обычно оценивается значением его постоянной времени τ - времени, в течение которого показания прибора при скачкообразном изменении расхода от Q_1 до Q_2 изменяются приблизительно на две трети от значения $Q_2 - Q_1$. (Так, например, турбинные расходомеры имеют малую постоянную времени – сотые доли секунды, расходомеры же с сужающими устройствами – секунды, что связано с длиной соединительных трубок, измерительным объемом прибора и т.д.).

5. *Широкий диапазон измерения*, определяемый отношением (Q_{\max}/Q_{\min}), что позволяет применять средства учета, когда значения расхода могут изменяться в значительных пределах. У применяемых в настоящее время расходомеров диапазон измерения может варьироваться в следующих пределах: 1:10, 1:20, 1:30, 1:50, 1:100.

1.2. Классификация средств измерения расхода

При коммерческом учете энергоносителей средства измерения расхода различных сред являются основными устройствами.

Существующие устройства учета расхода по *пропускной способности* можно классифицировать на следующие группы:

- бытовые – с пропускной способностью до 10 м³/ч;
- коммунально-бытовые – с пропускной способностью 10 - 40 м³/ч;
- промышленные – с пропускной способностью свыше 40 м³/ч.

Приборы измерения расхода подразделяются на массовые и объемные, среди которых можно выделить ряд групп, использующих различные методы измерения. Классификация средств измерения расхода для газообразных и жидких и сред приведена на рис. 1.1.

Приборы, основанные на гидродинамических методах:

- переменного перепада давления (с сужающими устройствами и напорные трубки);
- обтекания (ротаметры, поплавковые, поршневые, и с поворотным крылом);
- вихревые (струйные, вихревые).

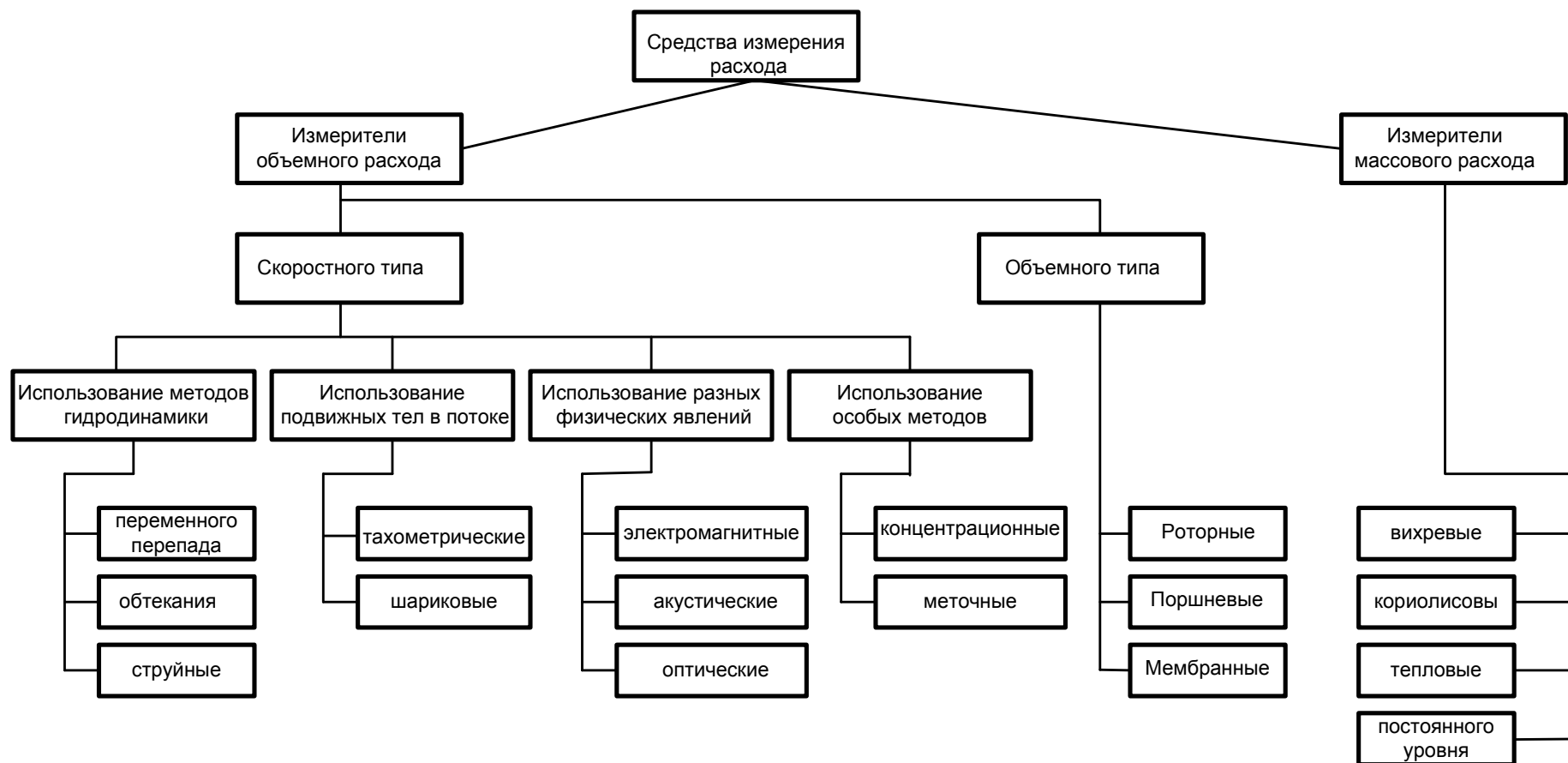


Рис. 1.1 – Общая классификация средств измерения расхода жидкостей и газов

Приборы с непрерывно движущимся телом:

- тахометрические (турбинные, камерные, барабанные, ротационные, мембранные объемные счетчики и др.);
- силовые (массомеры, в работе которых используется Кориолисов эффект, непосредственного взвешивания- щелевые или расходомеры постоянного уровня).

Приборы, основанные на различных физических явлениях:

- тепловые (калориметрические, с внешним нагревом, и термоанемометрические);
- акустические (ультразвуковые);
- электромагнитные;
- оптические (лазерно-доплеровские анемометры).

Приборы, основанные на особых методах:

- меточные;
- концентрационные.

В основу работы измерителей расхода скоростного типа заложено измерение скорости потока с последующим умножением ее на площадь поперечного сечения трубопровода. В измерителях же объемного типа определяется время заполнения и опорожнения постоянного внутреннего объема расходомера измеряемой средой.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается расходомер от счетчика?
2. Какие энергоносители используются в промышленности и коммунальном хозяйстве?
3. В каких единицах измеряются расходы энергоносителей и связь между ними?
4. Как связаны метрологические характеристики средств учета энергоносителей с их физико-химическими свойствами?
5. Какие требования предъявляются к приборам коммерческого учета?
6. Перечислите известные методы измерения расхода жидких и газообразных сред.
7. Какие виды контроля используются при коммерческом учете энергоносителей?
8. Назовите группы приборов учета по пропускной способности.

2. СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА ВЕЩЕСТВА

2.1. Измерение скоростей и расходов напорными трубками

2.1.1. Общие сведения о методе измерения скоростей потока

Напорные трубки применяют для измерения скорости и давления в потоках, а также для измерения скоростей в пограничных слоях при экспериментальных исследованиях как в лабораторных, так и в производственных условиях. Они используются также для измерения расхода жидкостей и газов при исследованиях, испытаниях и в ряде других случаев^{*}. Напорные трубки относятся к приборам переменного перепада давления.

Измерение скорости потоков жидкости или газа напорными трубками сводится к измерению динамического давления (скоростного напора), определяемого разностью полного и статического давлений и связано со скоростью соотношением, получаемым из уравнения Бернулли

$$\Delta P = P_{\Pi} - P_c = \frac{\rho \cdot V^2}{2}, \quad (2.1)$$

откуда скорость невозмущенного потока в точке измерения будет равна:

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2.2)$$

где V - скорость движения газа или жидкости, м/с;

ρ - плотность жидкости или газа в рабочих условиях, кг/м³;

P_{Π} - полное давление в лобовой точке напорной трубки, Па;

P_c - статическое давление в невозмущенном потоке, Па.

Таким образом, для определения динамического давления $\rho V^2/2$, а следовательно, и скорости в данной точке потока необходимо измерить разность полного и статического давлений. Измерение полного давления

*

Специальные напорные трубки применяют, кроме того, для измерения скорости полета летающих аппаратов относительно воздушной среды

может быть осуществлено напорной трубкой с отверстием на лобовом ее конце (в критической точке), установленной навстречу движению потока, а статическое давление - через одно или несколько отверстий в стенке трубы (см. рис. 2.1). Так как для определения скорости в данной точке потока нужно измерить только разность давлений $P_{\Pi} - P_c$, то обе трубки следует присоединить к микроманометру или жидкостному дифманометру. В уравнение (2.2) входит плотность среды, которую необходимо определить для рабочих условий с максимально возможной точностью.

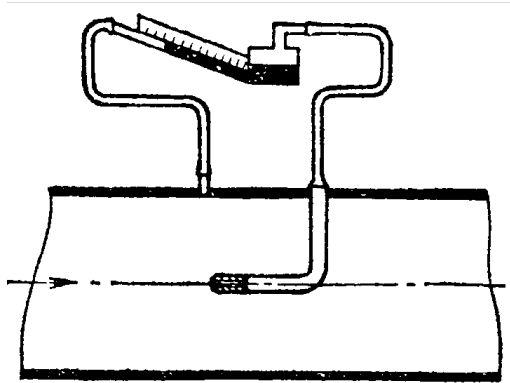


Рис. 2.1 - Схема измерения динамического давления напорной трубкой

Рассмотренный метод впервые был применен в 1732 году Пито для измерения скорости в потоке воды, поэтому комбинированную напорную трубку, схематично показанную на рис. 2.2, называют трубкой Пито.

В настоящее время применяют различные конструкции напорных трубок, приспособленных как для лабораторных, так и для промышленных измерений скоростей потока. Здесь уместно отметить также, что как бы удачна ни была конструкция трубки, динамическое давление измеряется не достаточно точно. Поэтому в правую часть формулы (2.2) вводят поправочный коэффициент ξ , тогда

$$V = \xi \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}. \quad (2.3)$$

Коэффициент ξ различен для разных конструкций напорных трубок и определяется путем их градуировки на специальных стендах.

2.1.2. Устройство напорных трубок

Из числа существующих напорных трубок широко применяется как в лабораторных, так и в промышленных условиях дифференциальная трубка

Пито с полусферической головкой наконечника, снабженная державкой, приведенная на рис. 2.2.

В этой трубке полное давление потока передается через отверстие на лобовом конце наконечника трубки, статическое - через узкую прерывистую щель на поверхности наконечника. По каналам в теле цилиндрического наконечника и в державке трубки давления передаются к прибору, измеряющему разность давлений $P_n - P_c$. На этом же рисунке приведены также кривые, характеризующие распределение давлений по поверхности наконечника (цилиндрического участка) трубки с учетом влияния, оказываемого державкой (трубка, перпендикулярна к наконечнику). На оси ординат отложено отношение $\frac{2(P - P_c)}{\rho \cdot V^2}$, где P - давление в данной точке

поверхности наконечника трубки; P_c - статическое давление в невозмущенном потоке.

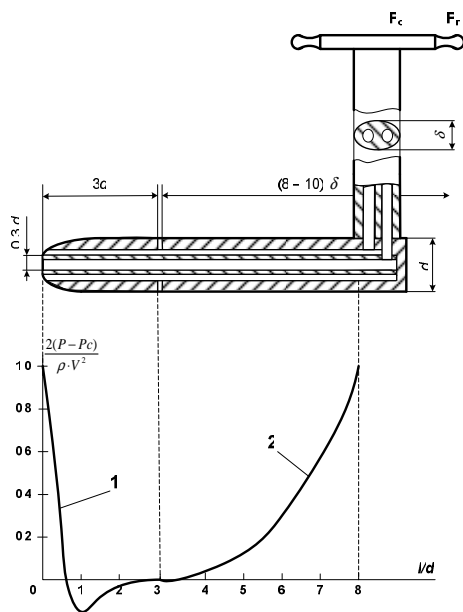


Рис.2.2 -Дифференциальная трубка Пито

На оси абсцисс отложено отношение l/d , здесь l - расстояние от наконечника трубки до ее державки; d - наружный диаметр трубки.

Кривая 1 характеризует распределение давлений вдоль образующей наконечника трубки без учета влияния, оказываемого державкой. Кривая 2 характеризует распределение давлений, обусловленных влиянием державки. В лобовой точке наконечника (критическая точка) соотношение $\frac{2(P - P_c)}{\rho \cdot V^2} = 1$, что определяет выполнение

отверстия в этой точке для приема полного давления. На поверхности наконечника трубки от критической точки на расстоянии $3d$ давление потока становится равным статическому давлению, что определяет положение щели в теле трубки для приема статического давления. Иногда для измерения статического давления на поверхности трубки вместо щели делают отверстия.

Для дифференциальных трубок должны быть строго определены формы и размеры, приведенные на рис. 2.2.

При применении дифференциальной трубки необходимо учитывать, что трубка с большим диаметром наконечника может вызвать изменение распределения скоростей в потоке в том месте, где производится измерение. На рис. 2.3 представлен график, дающий представление о возможных значениях относительной погрешности измерения средней скорости потока в трубах при помощи трубки в зависимости от отношения диаметра наконечника трубки d к диаметру трубы D . Поскольку дифференциальную трубку малых размеров достаточно точно изготовить затруднительно, то для измерения скоростей в трубах небольшого диаметра, а также в пограничных слоях применяют напорные с диаметром наконечника 0,5-1 мм. В этом случае статическое давление измеряют через отверстие в стенке труб.

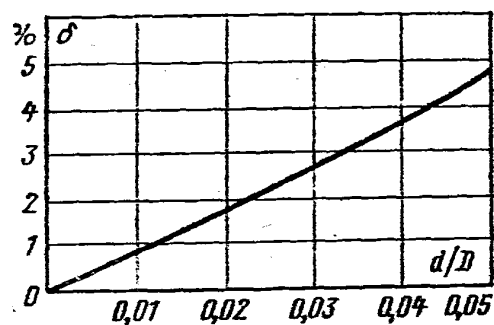


Рис. 2.3 - Погрешность определения средней скорости напорной трубкой

Напорные трубки применяют для измерения скоростей потоков величиной не менее 5 м/с. Помимо описанных трубок могут применяться и трубки других конструкций.

2.2. Расходомеры постоянного перепада давления

Расходомеры постоянного перепада давления относятся к средствам измерения, называемыми также расходомерами обтекания. В основу их работы заложено измерение вертикального перемещения чувствительного элемента (поплавка, поршня и т.д.), зависящего от расхода измеряемой среды. Перемещение чувствительного элемента одновременно приводит к изменению площади проходного сечения расходомера таким образом, что перепад давления на чувствительном элементе остается постоянным. Противодействующей силой в расходомерах этого вида является сила тяжести

чувствительного элемента. К приборам постоянного перепада давления относятся ротаметры, поршневые и поплавковые расходомеры, схемы которых приведены на рис.2.4.

Ротаметры, широко применяются в лабораторных и промышленных условиях, предназначены для измерения плавно меняющегося объемного расхода однородных потоков чистых или слабозагрязненных жидкостей и газов с дисперсными включениями инородных частиц (ГОСТ 13045-67).

Ротаметр (см. рис. 2.4-а) состоит из вертикальной конусной стеклянной трубки 1, внутри которой находится чувствительный элемент 2, выполненный в виде поплавка. Для обеспечения устойчивой работы поплавок верхний его обод снабжен каналами с крутым наклоном. Под действием потока жидкости или газа поплавок вертикально перемещается и одновременно получает вращательное движение и центрируется в середине потока. По перемещению поплавок ротаметра вдоль его шкалы, нанесенной на конусной стеклянной

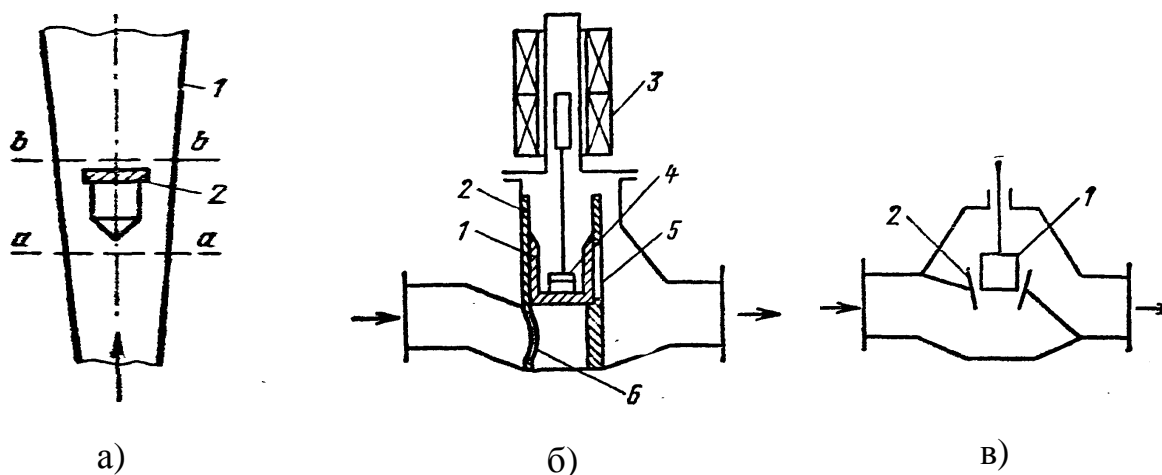


Рис. 2.4 - Расходомеры постоянного перепада давления

а- ротаметр; б-поршневой расходомер; в- поплавковый расходомер
 трубке, судят об объемном расходе в единицу времени (л/ч, м³/ч).
 Применяются также ротаметры, у которых поплавок выполнен из металла и не совершает вращательного движения.

В приборе, называемом поршневым расходомером (см. рис. 2.4-б) чувствительным элементом является поршень 1, находящийся внутри втулки 2. Эта втулка имеет круглое входное отверстие 6 и прямоугольное выходное

отверстие 5. Выходное отверстие играет роль диафрагмы переменного сечения. Размеры его выбираются в зависимости от пропускной способности расходомера. Сила тяжести поршня регулируется в зависимости от верхнего предела измерения с помощью дополнительных грузов 4. поршень с помощью штока соединен с сердечником передающего преобразователя 3. Протекающая через входное отверстие измеряемая среда поступает под поршень и поднимает его. Поршень, перемещаясь вверх, открывает в большей или меньшей степени отверстие выходной диафрагмы. Протекающая через диафрагму среда одновременно заполняет надпоршневое пространство, которое соединено с каналом за диафрагмой. Прямоугольная форма выходного отверстия обеспечивает линейную зависимость между подъемом поршня и расходом вещества.

Поплавковый расходомер постоянного перепада давления (рис. 2.4-в) состоит из чувствительного элемента 1, выполненного в виде поплавка, и конического седла 2, расположенного в корпусе прибора. В расходомерах этого типа коническое седло выполняет ту же роль, что и коническая трубка у ротаметра. Различие заключается лишь в том, что длина и диаметр седла примерно равны, в то время как у ротаметра длина конической трубки значительно больше ее диаметра.

Следует отметить, что поршневые и поплавковые расходомеры широкого распространения не получили.

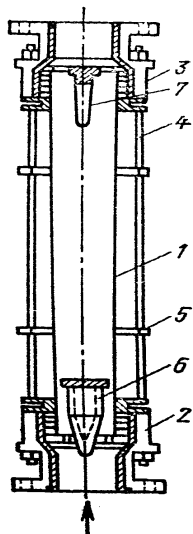
2.2.1. Устройство ротаметров

Ротаметры, применяемые для измерения объемного расхода жидкостей и газов, имеют несколько разновидностей.

Ротаметры, применяемые для местного измерения расхода, изготавливаются со стеклянной конусной трубкой в виде показывающих приборов. Ротаметры, имеющие металлический корпус, снабжаются передающими измерительными преобразователями с электрическим или пневматическим выходным сигналом. Эти ротаметры работают в комплекте с

вторичными приборами. Ротаметры с металлическим корпусом близки по своему устройству к поплавковым расходомерам.

Указанные ротаметры выпускаются с классами точности: 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 по ГОСТ 13045-67.



**Рис. 2.5 - Ротаметр со
стеклянной конусной трубкой**

На рис. 2.5 показано устройство ротаметра со стеклянной конусной трубкой 1, которая зажата в патрубках 2 и 3, снабженных сальниками. Оба патрубка между собой связаны тягами 4 с надетыми на них ребрами 5. Это придает прибору необходимую прочность. Внутри патрубка 2 имеется седло, на которое опускается поплавок 6 при отсутствии расхода измеряемой среды. Верхний патрубок 3 снабжен ограничителем хода поплавка 7. Шкала наносится непосредственно на внешней поверхности стеклянной конусной трубки.

Указателем у ротаметров со стеклянной трубкой служит верхняя горизонтальная плоскость поплавка.

Ротаметры со стеклянной конусной трубкой применяются для измерения расхода газов или прозрачных жидкостей, находящихся под давлением не более 6 кгс/см^2 (0,6 МПа).

Для дистанционной передачи информации о расходе измеряемой среды используют ротаметры, снабженные передающими преобразователями с электрическим выходным сигналом, которые показаны на рис. 2.6.

Ротаметр, показанный на рис. 2.6-а, имеет конический поплавок 1, который перемещается внутри кольцевой диафрагмы 2 под действием проходящего снизу вверх потока жидкости. При подъеме поплавка проходное отверстие между рабочей поверхностью поплавка и внутренней кромкой диафрагмы увеличивается пропорционально изменению расхода среды.

Поплавок ротаметра жестко связан с сердечником 3 передающего дифференциально-трансформаторного преобразователя 4. Катушка дифференциально-трансформаторного преобразователя надета на разделительную трубку 5, изготовленную из немагнитной стали.

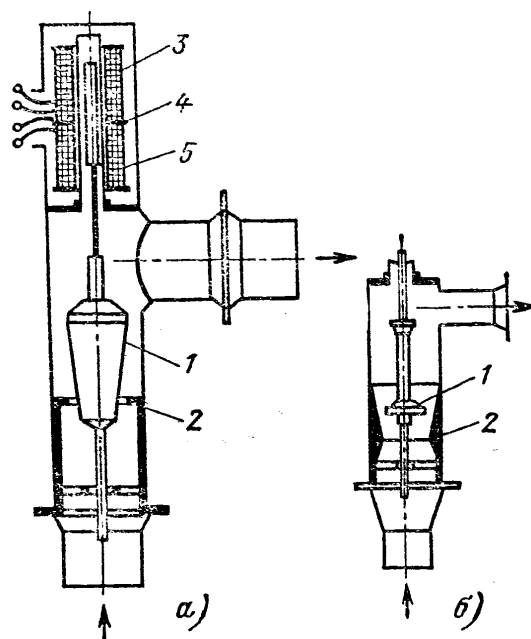


Рис. 2.6 - Ротаметр с дифференциально-трансформаторным преобразователем:

а- с коническим поплавком; б- с грибообразным поплавком

В ротаметре, показанном на рис. 2.6-б используется грибообразный поплавок 1, перемещающийся под действием потока внутри вертикально расположенной конической трубки-вставки 2.

Ротаметры, с преобразователями сигналов в комплекте с вторичным прибором, имеют класс точности не более 2,5. Они выпускаются для измерения расхода среды, находящейся под рабочим избыточным давлением до 16 и 64 кгс/см² (1,6 и 6,4 МПа). Ротаметры могут быть изготовлены также и на большее рабочее избыточное давление. Кроме того, предусматривается выполнение ротаметров в соответствии с системой ГСП с выходными сигналами постоянного тока 0-5 мА и с пневматическим выходным сигналом 0,2-1 кгс/см² (0,02—0,1 МПа). Для преобразования перемещения поплавка ротаметра в пневматический выходной сигнал применяют передающие пневматические преобразователи компенсационного типа.

2.2.2. Краткие сведения из теории ротаметров

Поток жидкости или газа, протекающий снизу вверх в конусной трубке ротаметра (см. рис. 2.4-а), поднимает поплавок до тех пор, пока площадь кольцевого отверстия F_k между поплавком и внутренней поверхностью

конусной трубки не достигнет такого размера, при котором действующие на поплавков силы не будут уравновешены. При достижении равновесия сил поплавков устанавливается на высоте, соответствующей определенному значению расхода.

На носовую часть поплавка снизу вверх действуют две силы: сила давления потока $f = p'_1 \cdot F_\kappa$ и сила трения потока о поплавков $f_\tau = k \omega_{\text{cp}}^n \cdot F_{\text{бп}}$. Сверху вниз на поплавков действуют также две силы: сила тяжести поплавка $f_\pi = V_\pi \cdot \rho_\pi \cdot g$ и сила от давления потока $f_2 = p'_2 \cdot F_\kappa$. Здесь p'_1 и p'_2 - среднее давление потока на единицу носовой и верхней поверхностей поплавка соответственно. Отсюда условие равновесия поплавка может быть определено следующим уравнением:

$$p'_1 \cdot F_\pi + k \omega_{\text{cp}}^n \cdot F_{\text{бп}} = p'_2 \cdot F_n + V_\pi \cdot \rho_\pi \cdot g, \quad (2.4)$$

где F_π - площадь наибольшего поперечного сечения поплавка;

k - коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса и шероховатости поверхности поплавка;

ω_{cp} - средняя скорость потока в кольцевом сечении;

n - показатель, зависящий от величины скорости потока;

V_π - объем поплавка;

ρ_π - плотность материала поплавка.

Из уравнения равновесия поплавка определяется разность средних давлений между его носовой и верхней частью:

$$p'_1 - p'_2 = \frac{1}{F_n} (V_\pi \cdot \rho_\pi \cdot g - k \cdot \omega_{\text{cp}}^n \cdot F_{\text{бп}}) \quad (2.5)$$

Так как с увеличением расхода площадь кольцевого сечения между поплавком и внутренней стенкой трубы увеличивается, то можно допустить, что средняя скорость потока в ротаметре остается постоянной и правая часть выражения (2.5) будет также постоянной, т.е. $p'_1 - p'_2 = \text{const}$. Отсюда следует, что ротаметр является расходомером постоянного перепада давления.

Разность давлений, действующая на поплавков, зависит также от силы динамического давления набегающего потока, определяемой в соответствии с формулой:

$$f_d = \psi \cdot F_n \cdot \frac{\rho \cdot \omega_a^2}{2}, \quad (2.6)$$

где ψ – коэффициент лобового сопротивления поплавка;

ρ – плотность измеряемой среды;

ω_a^2 – средняя скорость потока в сечении $a - a$.

Тогда полный перепад давления на ротаметре определится в соответствии со следующим выражением:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{F_n} (V_n \cdot \rho_n \cdot g - k \cdot \omega_{cp}^n \cdot F_{он} - \psi \cdot F_n \cdot \frac{\rho \cdot \omega_a^2}{2}) \quad (2.7)$$

Из этого выражения следует, что с увеличением расхода (следовательно, и скорости ω_a) значение перепада давления на поплавке будет уменьшаться. Полный же перепад давления на ротаметре будет увеличиваться, что объясняется ростом потери давления с увеличением расхода.

Для получения уравнения расхода среды через ротаметр воспользуемся уравнением Бернулли для сечений $a - a$ и $b - b$.

$$\frac{p_a}{\rho \cdot g} + \frac{k_a \cdot \omega_a^2}{2g} + l_a = \frac{p_b}{\rho \cdot g} + \frac{k_b \cdot \omega_b^2}{2g} + l_b + \xi \cdot \frac{\omega_b^2}{2g}, \quad (2.8)$$

где l_a и l_b – высоты сечений над некоторым начальным уровнем;

ξ – коэффициент потери энергии между выбранными сечениями.

Согласно условию неразрывности струи для рассматриваемых сечений будет справедливо равенство:

$$Q_o = \omega_a \cdot F_a = \omega_b \cdot F_b = \omega_b \cdot \mu \cdot F_k, \quad (2.9)$$

где Q_o – объемный расход среды;

F_a , F_b – площади соответствующих сечений;

$\mu = F_b / F_k$ коэффициент сужения струи;

F_k – площадь кольцевого зазора между поплавком и стенкой.

Из уравнения (2.7), учитывая условие неразрывности струи, получаем:

$$\frac{2(p_a - p_b)}{\rho} - 2g(l_b - l_a) = \frac{Q_o^2}{\mu^2 F_k^2} \left[k_b + \xi - k_a \cdot \mu^2 \left(\frac{F_k}{F_a} \right)^2 \right].$$

Подставляя в это выражение значение перепада давления на ротаметре, определяемое в соответствии с уравнением (2.8), и выражая Q_o , получим:

$$Q_o = \alpha \cdot F_k \cdot \sqrt{\frac{2gV_n \cdot (\rho_n - \rho)}{\rho \cdot F_n}}, \quad (2.10)$$

Из этого уравнения вытекает, что расход среды, проходящий через ротаметр, зависит от двух переменных α – коэффициент расхода, определяемый экспериментально, и F_k – площади кольцевого зазора, значение которой пропорционально расходу.

2.3. Скоростные расходомеры и счетчики количества

2.3.1. Тахометрические расходомеры

Тахометрические счетчики количества жидкости или газа состоят из тахометрического преобразователя расхода и счетного суммирующего механизма. Под тахометрическим преобразователем расхода понимается первичный преобразователь, в котором скорость движения рабочего (чувствительного) элемента, взаимодействующего с потоком измеряемой среды, пропорциональна объемному расходу.

По принципу действия, выпускаемые тахометрические счетчики количества разделяются на скоростные и объемные. Эти технические средства в зависимости от того, для измерения какой среды они предназначены, называются водосчетчиками, нефтесчетчиками, газосчетчиками и т. д.

В скоростных счетчиках в качестве рабочего элемента применяют вертикальные и горизонтальные турбины (вертушки). У счетчиков с вертикальной турбиной поток измеряемой среды, вращающий ее, направлен по касательной к окружности, описываемой средним радиусом вертушки. Такие турбины обычно называют тангенциальными. У счетчиков с горизонтальной

вертушкой поток жидкости направлен параллельно оси вертушки. Эти турбины называют аксиальными.

Угловая скорость турбины пропорциональна средней скорости потока, а следовательно, и объемному расходу. Число оборотов турбины прибора суммируется счетным механизмом, а количество измеряемой среды в единицах объема указывается счетным указателем.

Объемные тахометрические счетчики, обладающие более высокой точностью по сравнению со скоростными, применяют для измерения суммарного количества жидких сред. В объемных счетчиках протекающая через него жидкость измеряется отдельными, равными по объему дозами, отсекаемыми одним или несколькими рабочими элементами. Число пропущенных доз жидкости суммируется счетным механизмом, а суммарное количество жидкости, прошедшее через прибор за определенный промежуток времени, показывается счетным указателем.

Тахометрические расходомеры и счетчики обычно характеризуются следующими техническими данными: диаметром условного прохода; допускаемой основной погрешностью; потерей давления; начальным, номинальным и верхним пределами измерений; порогом чувствительности; емкостью счетчика – наибольшим значением измеряемой величины, показываемой счетным механизмом; предельно допустимыми давлением и температурой измеряемой среды.

Счетчики с вертикальной вертушкой применяют главным образом для измерения суммарного количества среды в горизонтальных трубопроводах при небольших расходах.

В зависимости от способа подведения измеряемой среды к лопастям вертушки счетчика они разделяются на одноструйные и многоструйные. Как в одноструйных, так и в многоструйных счетчиках среда к лопастям вертушки подводится тангенциально. В одноструйных счетчиках жидкость или газ подводится в камеру вертушки и отводится из нее на одном уровне, что

обеспечивает их протекание по кратчайшему пути без образования мертвых зон. Это уменьшает потерю давления в приборе.

Корпус скоростного одноструйного счетчика выполняется с коническими входным и выходным патрубками (см. рис. 2.7.).

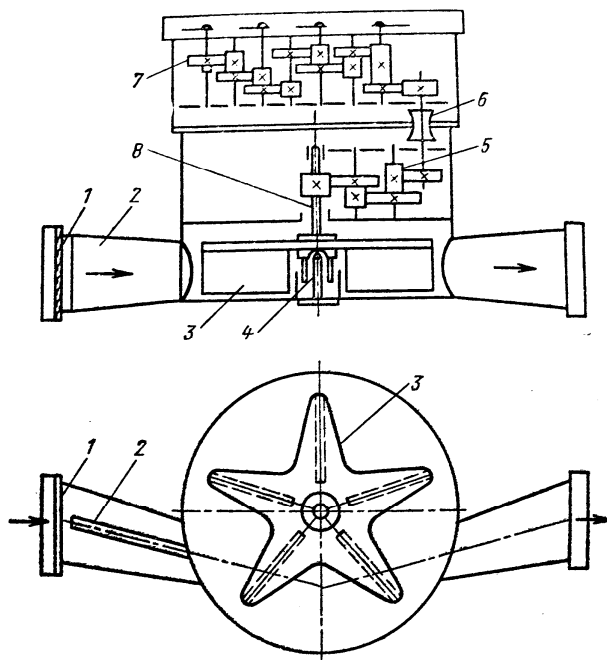


Рис. 2.7 - Схема скоростного одноструйного счетчика с горизонтальной турбиной:

- 1- сетка; 2- струевыпрямитель; 3- вертушка (горизонтальная турбина);
4- опорный шип; 5- передаточный механизм (редуктор); 6- сальник;
7- счетный механизм; 8- ось турбины.

В расширенной части входного патрубка установлена металлическая сетка, предохраняющая прибор от попадания посторонних тел. За сеткой во входном патрубке установлен струевыпрямитель. Крыльчатая вертушка прибора соединяется с помощью передаточного механизма (редуктора) со счетным механизмом; редуктор и счетный механизм соединяются осью через сальниковое уплотнение. Счетный механизм отделен от проточной части прибора герметичной перегородкой, в которой установлен сальник передаточной оси.

Многоструйные счетчики применяются в основном для измерения расхода жидких сред. Схема такого счетчика приведена на рис. 2.8. В этом

приборе жидкость несколькими струями поступает к крыльчатке через входной патрубок и по спирали поднимается вверх вдоль оси турбины в верхнюю часть корпуса, а затем – в выходной патрубок. В многоструйных водосчетчиках вращение турбины передается счетному механизму так же, как и у одноструйных.

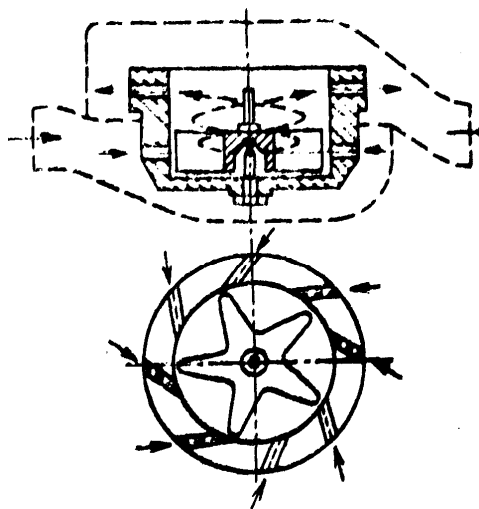


Рис. 2.8 – Схема многоструйного водосчетчика

Скоростные счетчики с винтовой вертушкой (аксиальной турбиной) применяют для измерения Большого суммарного количества жидких или газообразных сред. Они могут быть установлены на горизонтальных участках, а также на наклонных и вертикальных участках с восходящим потоком измеряемой среды. Так, например, в водосчетчиках этого типа (см. рис. 2.9) жидкость, протекающая через прибор, вращает вертушку, представляющую собой многоходовой винт с большим шагом. Число оборотов винтовой вертушки пропорционально средней скорости потока жидкости и обратно пропорционально шагу лопасти:

$$n = k \frac{\omega_{\text{ср}}}{l}, \quad (2.11)$$

где n - число оборотов вертушки в секунду;

$\omega_{\text{ср}}$ - средняя скорость потока жидкости, м/с;

k - постоянный коэффициент для данного счетчика;

l - шаг лопастей винтовой вертушки, м.

Принимая во внимание, что $\omega_{cp} = \frac{Q_o}{F_o}$, получим:

$$n = k \frac{Q_o}{F \cdot l}, \quad (2.12)$$

где Q_o - объемный расход жидкости, м³/с;

F - площадь живого сечения прибора, м².

Для обеспечения постоянства метрологических характеристик прибора необходимо, чтобы направление потока жидкости было параллельно оси вертушки, т.к. незначительные отклонения в движении потока влияют на число оборотов. Для стабилизации направления потока перед вертушкой со стороны входа потока жидкости устанавливают струевыпрямитель. Кроме того, необходимо, чтобы перед прибором был прямой участок трубы длиной не менее $(8-10)D$, а после него - не менее $5D$, где D - диаметр трубы.

Вертушка водосчетчика, как показано на схеме, связана посредством червячной передачи и вала с передаточным механизмом (редуктором), который, в свою очередь, через передаточную ось с сальниковым уплотнением

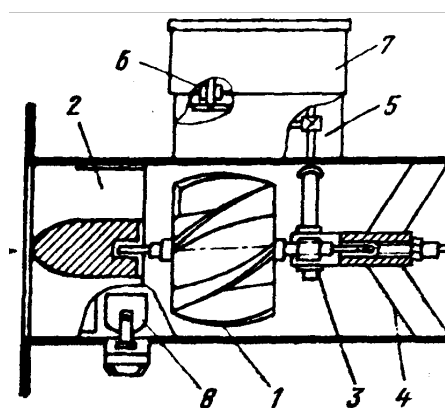


Рис. 2.9 - Схема водосчетчика с винтовой вертушкой:

- 1- винтовая вертушка; 2- струевыпрямитель;
- 3- червячная пара; 4- кронштейн;
- 5- камера передаточного механизма;
- 6- передаточная ось с сальником;
- 7- место для счетного механизма;
- 8- пластина-регулятор.

соединен со счетным механизмом. Для изменения угловой скорости вертушки счетчика при его градуировке служит пластина-регулятор, которая является продолжением укороченной радиальной перегородки струевыпрямителя.

В настоящее время в тахометрических скоростных расходомерах используют турбинные и шариковые преобразователи расхода, схемы которых представлены на рис. 2.10.

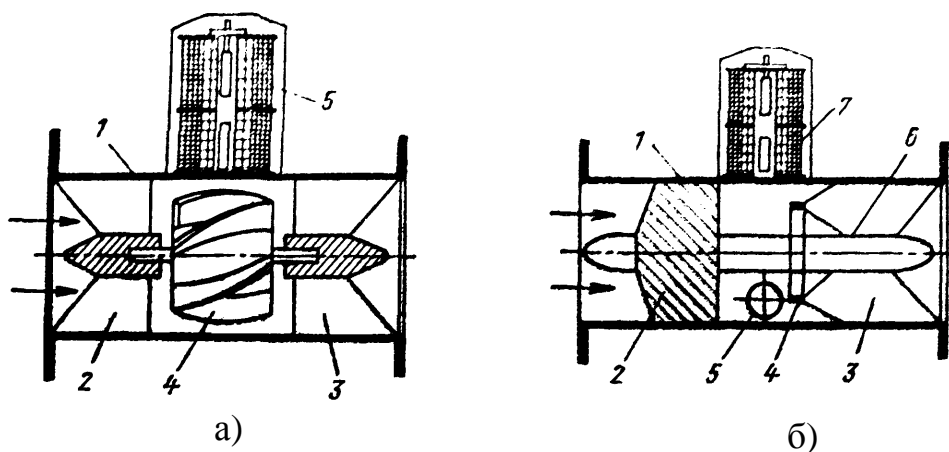


Рис. 2.10 - Тахометрические преобразователи расхода:

а- турбинный; б- шариковый.

Преобразователи и вторичные приборы этих расходомеров имеют унифицированные выходные и входные сигналы постоянного тока. Унификация выходных и входных сигналов преобразователей и вторичных приборов тахометрических расходомеров необходима для дистанционной передачи сигналов этих расходомеров, что существенно повышает надежность действия измерителей и позволяет применять их при автоматизации технологических процессов и в системах с информационно-вычислительными и управляющими машинами.

На рис. 2.10-а схематично показано устройство первичного турбинного преобразователя расхода. Корпус преобразователя 1 представляет собой отрезок трубы с двумя фланцами для присоединения его к трубопроводу. Внутри корпуса преобразователя установлены струевыпрямители 2 и 3, соединенные неподвижной осью, на которой расположена турбина с винтовыми лопастями 4, вращающаяся на подшипниках. Лопасти турбины преобразователя выполнены из ферромагнитного материала. На внешней стороне корпуса 1, установлен передающий дифференциально-трансформаторный преобразователь 5.

Устройство первичного шарикового преобразователя расхода схематично показано на рис. 2.10-б. Корпус этого преобразователя расхода

выполнен аналогично с корпусом турбинного преобразователя. Внутри корпуса шарикового преобразователя 1 расположен неподвижный сборный узел, состоящий из струенаправляющего устройства 2, выполненного в виде многозаходного винта, и струевыпрямителя 3. На крестовине струевыпрямителя находится ограничивающее кольцо 4. В пространстве между этим кольцом и струенаправляющим устройством находится шарик 5 из ферромагнитного материала, который может свободно вращаться вокруг ступицы 6. На корпусе шарикового преобразователя установлен передающий дифференциально-трансформаторный преобразователь 7.

В рассмотренных первичных скоростных тахометрических преобразователях расхода измеряемая среда, протекающая через преобразователь, приводит во вращение турбинку или шарик. Частота вращения турбинки или шарика пропорциональна средней скорости потока измеряемой жидкости в данном сечении преобразователя, а, следовательно, и объемному расходу. Установленный с наружной стороны корпуса первичного тахометрического преобразователя расхода бесконтактный передающий преобразователь формирует электрические импульсы, частота которых зависит от частоты вращения турбинки или шарика.

Наиболее широкое распространение получили два типа бесконтактных передающих преобразователей - магнитоэлектрический и дифференциально-трансформаторный.

Магнитоэлектрический передающий преобразователь используется в первичных тахометрических преобразователях, имеющих большие диаметры условного прохода. Этот преобразователь состоит из постоянного магнита, на котором намотана катушка. Прохождение мимо сердечника магнита ферромагнитной лопасти турбинки или шарика приводит к появлению электрического импульса в цепи катушки.

Передающие дифференциально-трансформаторные преобразователи применяются в выпускаемых первичных турбинных и шариковых преобразователях расхода с диаметрами условного прохода до 200 мм. В этом преобразователе при проходе ферромагнитной лопасти или шарика у сердечника трансформатора изменяется взаимная индуктивность между обмотками трансформатора, что приводит к возникновению на выходе

преобразователя сигнала переменного тока с частотой 3-6 кГц, которые затем преобразуются в унифицированный сигнал постоянного тока 4-20 мА.

2.3.2. Электромагнитные расходомеры

Электромагнитные (индукционные) расходомеры применяют для измерения в трубопроводах объемного расхода электропроводных жидкостей, растворов и пульп с мелкодисперсными неферромагнитными частицами. Удельная электрическая проводимость измеряемой среды должна находиться в пределах от 10^3 до 10^5 См м.

Принцип действия таких расходомеров основан на законе электромагнитной индукции, согласно которому электродвижущая сила, наведенная в проводнике, пропорциональна скорости его движения в магнитном поле. В данном случае роль движущегося в магнитном поле проводника играет электропроводная жидкость, протекающая через первичный электромагнитный преобразователь расхода, установленный в трубопроводе.

Измерение расхода жидкости электромагнитным методом может быть осуществлено как при постоянном возбуждающем магнитном поле, так и при переменном поле первичного преобразователя расхода. Указанные способы создания магнитного поля имеют свои положительные и отрицательные стороны, рассматриваемые ниже.

Принципиальная схема электромагнитного расходомера приведена на рис. 2.11.

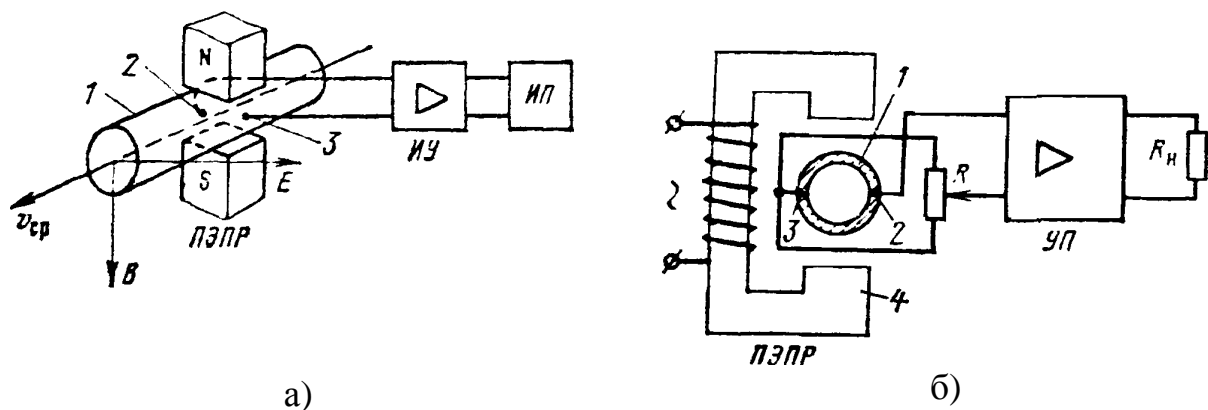


Рис. 2.11 –Принципиальная схема электромагнитного расходомера:

а- с постоянным магнитным полем; б- с переменным магнитным полем.

Расходомер с постоянным магнитным полем (см. рис. 2.11-а) состоит из первичного электромагнитного преобразователя расхода *ПЭПР*, электронного измерительного усилителя *ИУ* и вторичного измерительного прибора *ИП*. Корпус преобразователя расхода представляет собой отрезок трубы 1 из немагнитного материала с двумя фланцами для присоединения его к фланцам трубопровода. На внешней стороне корпуса, преобразователя установлен постоянный магнит **N-S**, магнитные силовые линии которого перпендикулярны вектору скорости движения жидкости. Для съема выходной э. д. с. преобразователя расхода служат электроды 2 и 3, проходящие через стенку трубы 1.

Электрическая проводимость материала трубы должна быть значительно меньше проводимости жидкости, т.к. в противном случае возможно шунтирование стенкой трубы выходной э. д. с. Если позволяют условия применения преобразователя расхода, то трубу целесообразно изготавливать из изоляционного материала. При необходимости труба может быть изготовлена из немагнитного металла, например из немагнитной нержавеющей стали с большим удельным сопротивлением. В этом случае внутренняя поверхность металлической трубы изолируется от жидкости специальным изоляционным материалом. Электроды для съема выходного сигнала также должны быть электрически изолированы от металлической трубы.

При протекании электропроводной жидкости через преобразователь расхода величина наводимой э. д. с. определяется в соответствии с формулой:

$$E = V_{\text{ср}} \cdot D \cdot B, \quad (2.13)$$

где E — выходная э. д. с, В;

$V_{\text{ср}}$ — средняя скорость движения жидкости, м/с;

D - внутренний диаметр трубы (расстояние между электродами), м;

B — магнитная индукция, Т.

Выражая в уравнении (2.13) скорость V через объемный расход, Q_0 , получим:

$$E = 4Q_0 \cdot B / \pi D, \quad (2.14)$$

что показывает прямую пропорциональность значения выходной э. д. с. объемному расходу.

Преимуществом преобразователей расхода с постоянным магнитным полем является то, что значительно облегчается борьба с помехами от внешних переменных электромагнитных полей. К числу достоинств следует отнести также отсутствие необходимости в источнике питания преобразователя расхода, безопасность работы его и ряд других факторов. Следует также иметь в виду, что преобразователи расхода с постоянным магнитным полем обладают значительно большим быстродействием, чем преобразователи расхода с переменным магнитным полем. У преобразователей последнего типа быстродействие ограничивается частотой поля.

Основным недостатком первичных преобразователей расхода с постоянным магнитным полем является поляризация электродов.

Электромагнитный расходомер с переменным магнитным полем (см. рис. 2.11-б) состоит из первичного электромагнитного преобразователя расхода (*ПЭПР*), включающего электромагнит переменного тока 4, усилительного преобразователя (*УП*) с унифицированным выходным сигналом постоянного тока 0-5 мА, согласующего сопротивления R и сопротивления внешней нагрузки (например, вторичный прибор, интегратор, входное устройство информационно-вычислительной машины и линия связи).

Требования, предъявляемые к материалам для изготовления трубы 1 и электродов 2 и 3 преобразователя расхода с переменным магнитным полем, аналогичны, что и для преобразователя с постоянным магнитным полем. Длину измерительного участка трубы выбирают в зависимости диаметра с таким расчетом, чтобы обеспечить симметричность профиля скоростей потока относительно оси трубы преобразователя расхода. Трубу преобразователя расхода, выпускаемого серийно, изготавливают из нержавеющей сталей марки X18H10T или X18H9T. Для изоляции внутренней поверхности трубы

применяются полиуретановый каучук, резина, фторопласт, кислотостойкая эмаль и другие изоляционные материалы.

Для электромагнита преобразователя расхода важно обеспечить однородность магнитного поля в осевом и поперечном направлениях. Неоднородность поля приводит к тому, что в жидкости (неподвижной и движущейся) возникают местные циркуляционные токи, размер которых определяется напряженностью поля в данной точке и в жидкости появляются разностные напряжения, искажающие измерения. Кроме того, при переходе от ламинарного потока течения жидкости к турбулентному появляется некоторая разность напряжений, приводящая к нелинейной зависимости между выходным сигналом и измеряемым расходом.

Магнитная индукция для преобразователя расхода с переменным магнитным полем выражается следующим образом:

$$B = B_{max} \cdot \sin \omega t, \quad (2.15)$$

где ω - круговая частота переменного тока, рад/с.

В этом случае э.д.с., возникающая на выходе преобразователя расхода, определится в соответствии с выражением:

$$E = 4Q_o \cdot B_{max} \cdot \sin \omega t / \pi D \quad (2.16)$$

Следует отметить, что эффект поляризации электродов имеет место и при переменном магнитном поле. Однако в этом случае он значительно меньше, чем при постоянном магнитном поле. Поляризация электродов приводит к образованию на их поверхности двойного слоя зарядов и нарастанию э. д. с. поляризации. Влияние поляризации электродов на точность измерения с возрастанием частоты поля уменьшается. Вредное влияние поляризации электродов на полезный сигнал уменьшается также с ростом значения входного сопротивления усилителя-преобразователя.

2.3.3. Расходомер с поворотным крылом

В связи со строительством большого количества автоматизированных насосных станций возникла необходимость в преобразователях расхода, удовлетворяющих следующим условиям: работа на загрязненных потоках жидкости; измерение расхода в широком диапазоне; простота конструкции и

эксплуатации; наличие стандартного выходного сигнала, который можно использовать в схеме автоматического регулирования.

Этим требованиям удовлетворяют расходомеры с поворотным крылом, которые по своей сути являются расходомерами обтекания.

Основным элементом преобразователя расхода такого типа является крыло, воспринимающее динамическое давление набегающего потока (см. рис. 2.12-а). У такого расходомера угол атаки (поворота) крыла пропорционален скорости потока измеряемой среды, а, следовательно, и объемному расходу в трубопроводе. На рис. 2.12-б представлена зависимость расхода от угла поворота для различных крыльев из которого видно, что увеличение массы крыла, а также отверстия в нем приводят к возрастанию диапазона измерения.

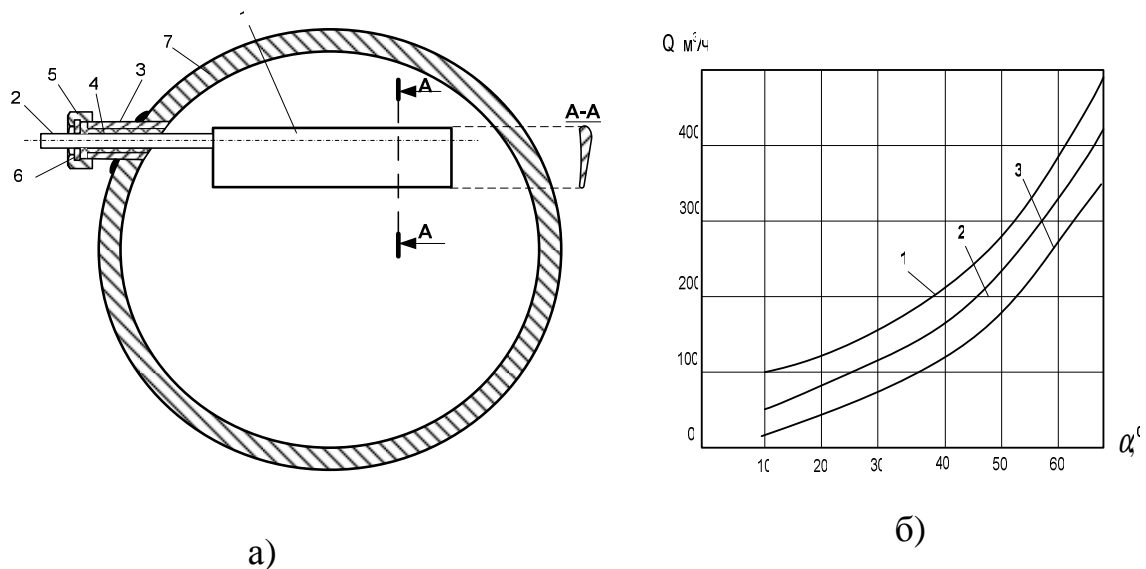


Рис. 2.12 - Расходомер с поворотным крылом

- а- схема расходомера:** 1- крыло; 2- ось крыла; 3- бобышка; 4- сальниковое уплотнение; 5- прижимная гайка; 6- бронзовый вкладыш; 7- трубопровод,
- б- зависимость расхода от угла поворота для крыльев различного профиля:** 1- крыло с малой массой; 2- крыло с большой массой с отверстием в центре тяжести; 3- крыло с большой массой без отверстия.

Для преобразования угла поворота крыла в электрический сигнал обычно используется преобразователь дифференциально-трансформаторной системы, плунжер которого связан с осью крыла. При повороте крыла от 0 до 90° выходной сигнал изменяется от нуля до 1000 мВ, а погрешность измерения расхода не превышает $\pm 1,5\%$.

Для всех типов крыльев необходимо учитывать коэффициент местного сопротивления экспериментальным путем, который уменьшается с увеличением диаметра отверстия в крыле.

2.3.4. Ультразвуковые расходомеры

Ультразвуковые расходомеры могут быть использованы для измерения расхода жидких и газообразных сред. В их основе лежат времяимпульсные преобразователи расхода. Принцип работы таких преобразователей заключается в измерении разности времен прохождения импульсов ультразвуковых колебаний по направлению движения потока измеряемой среды и против него. Возбуждение импульсов производится пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП), устанавливаемыми на измерительном участке трубопровода, в котором производится измерение расхода жидкости или газа. Принципиальная схема ультразвукового преобразователя и измерительного трубопровода приведены на рис. 2.13.

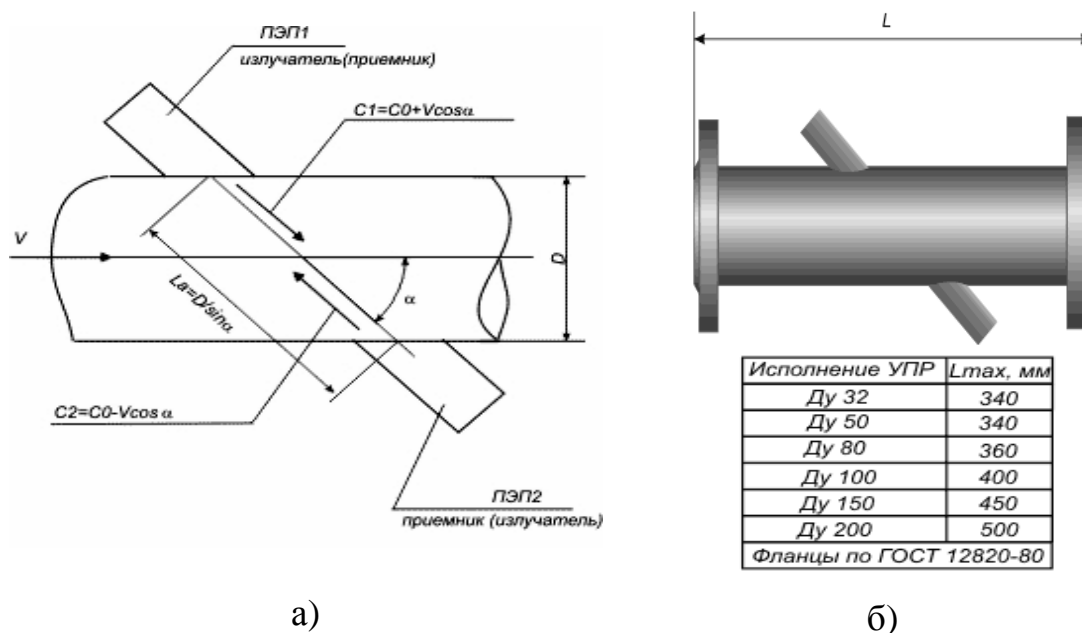


Рис. 2.13 - Схема ультразвукового преобразователя расхода:

а- принципиальная схема; б- измерительный трубопровод

Участок трубопровода с установленными на нем ПЭП 1 и ПЭП 2 образует первичный ультразвуковой преобразователь расхода (УПР).

Пьезоэлектрические преобразователи работают попеременно в режиме приемник-излучатель и обеспечивают излучение в измеряемую среду и прием из нее ультразвуковых импульсов под некоторым углом α к оси трубопровода. Движение измеряемой среды вызывает изменение времени полного распространения ультразвуковых сигналов по потоку и против него.

В составе ультразвукового расходомера имеется устройство, содержащее электронные узлы формирования и преобразования ультразвуковых импульсов, вычисления расхода, объема и вывода на основе измеренных времен распространения ультразвуковых импульсов, которое образует вторичный преобразователь - электронный блок (ЭБ). Общий вид ультразвукового расходомера жидкостей типа US-800 показан на рис. 2.14, а его технические характеристики приведены в табл. 2.1. Эти расходомеры в настоящее время широко используются в системах коммерческого учета теплоты и могут быть изготовлены с диаметрами условного прохода от 15 до 1000 мм и работают в диапазоне измерения расходов от 0,03 до 1350 м³/ч при ошибке измерения до 1%.



Рис. 2.14 - Ультразвуковой расходомер жидкости US-800

Таблица 2.1.

Технические характеристики расходомера US-800

Расход. м ³ /ч		Диаметр условного прохода УПР - Ду, мм									
		15	25	32	40	50	65	80	100	150	200
Максимальный	Q_{\max}	3.5	8	35	55	85	145	220	340	777	1350
Переходной	Q^1_P	0.3	0.7	2.2	2.7	3.4	4.4	5.4	6.8	10.2	13.6
	Q^2_P	0.1	0.2	1.1	1.3	1.7	2.2	2.7	3.4	5.1	6.8
Минимальный	Q^1_{\min}	0.1	0.3	0.7	0.8	1.0	1.3	1.6	2	2	4
	Q^2_{\min}	0.03	0.07	0.3	0.4	0.5	0.65	0.8	1	1.5	2
чувствительность		0.006	0.02	0.03	0.05	0.07	0.12	0.18	0.3	0.6	1.0
индексы в обозначении расходов:											
1- для температуры воды 1-60 °С;											
2- для температуры воды 60 -150 °С;											

Условия эксплуатации расходомера US-800:

Температура жидкости, °C	-40...+150
Давление жидкости в трубопроводе, МПа	1,6,2.5,4.0,6.0
Длина соединительных кабелей, м	0...2000
Число знакомест для индикации	9
Полный средний срок службы, лет	12
Межповерочный интервал, лет	4
Напряжение питания прибора, В	187...242
Потребляемая прибором мощность, ВА	7,0 ± 0,5
Габариты электронного блока, не более мм	200x150x130
Масса электронного блока, кг	1,2

Поскольку ультразвуковой метод основан на измерении двух времен, то можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{L}{C + V \cdot \cos \alpha} \\ T_2 = \frac{L}{C - V \cdot \cos \alpha} \end{cases}, \quad (2.17)$$

где T_1 , и T_2 - время прохождения звукового импульса в измеряемой среде по потоку и против потока, соответственно;

L – длина пути звукового импульса;

C - скорость звука в измеряемой среде,

V - скорость потока,

α - угол между направлением звука и осью потока

Если вычесть второе уравнение из первого, так как нас интересует разность времен распространения импульсов, и выразить значение скорости потока, то получим следующую формулу:

$$V = \frac{C^2}{2 \cdot L \cdot \cos \alpha} (T_1 - T_2) \quad (2.18)$$

Отсюда объемный расход, определяемый ультразвуковыми расходомерами, может быть вычислен по формуле:

$$Q_o = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot C^2}{8 \cdot L \cdot \cos \alpha} (T_1 - T_2), \quad (2.19)$$

где D –внутренний диаметр трубопровода.

Точность измерения расхода ультразвуковыми преобразователями

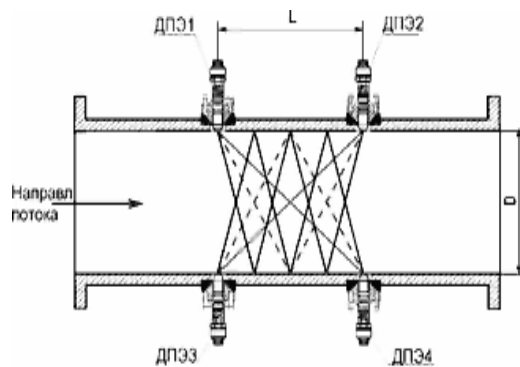
зависит от температуры и от гидродинамического режима течения потока измеряемой среды, который должен быть турбулентным при $Re \geq 8000$.

Применение ультразвуковых расходомеров наиболее целесообразно для жидких сред. Однако в настоящее время расходомеры данного типа получили распространение и для коммерческого учета газа, а также измерения расхода воздуха в системах вентиляции.

Для коммерческого учета природного газа широко применяется ультразвуковой расходомер «ГиперФлоу-УС», внешний вид которого и схема измерения приведены на рис. 2.15.



а)



б)

Рис. 2.15 – Ультразвуковой расходомер газа «ГиперФлоу-УС»

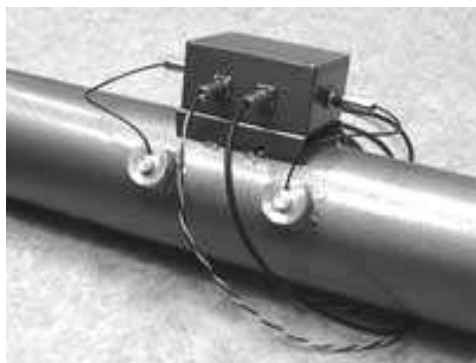
а- внешний вид; б- схема измерения.

Этот расходомер предназначен для измерения и приведения к нормальным условиям расхода и количества природного газа, а также других газовых сред в напорных газопроводах диаметром от 100 до 1600 мм. Отличительной его особенностью является отсутствие «карманов» для установки пьезоэлектрических преобразователей, что облегчает условия эксплуатации, сами же преобразователи устанавливаются перпендикулярно оси трубопровода (см. рис. 2.15-б). В работу расходомера заложен принцип многократного отражения импульса от внутренней стенки трубопровода на заданном его отрезке L .

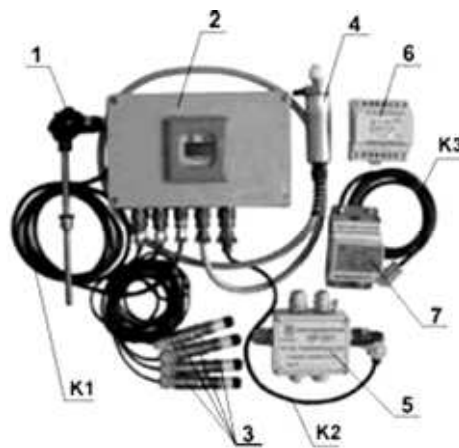
Среди базовых моделей ультразвукового расходомера «ГиперФлоу-УС» можно выделить и приборы, используемые для определения расхода воздуха в

воздуховодах систем вентиляции и кондиционирования. Датчик этого прибора может измерять, как объемный расход в рабочих условиях, так и массовый при введении в состав устройства датчика давления и температуры.

Внешний вид и состав такого расходомера представлены на рис. 2.16. Диапазон измерения расходомера составляет 5 – 600 м³/ч для интервала рабочих температур от -40 °С до 80 °С.



а)



б)

Рис. 2.16 - Ультразвуковой расходомер «ГиперФлоу-УС» моноблочная конструкция

а- внешний вид; б- состав расходомера

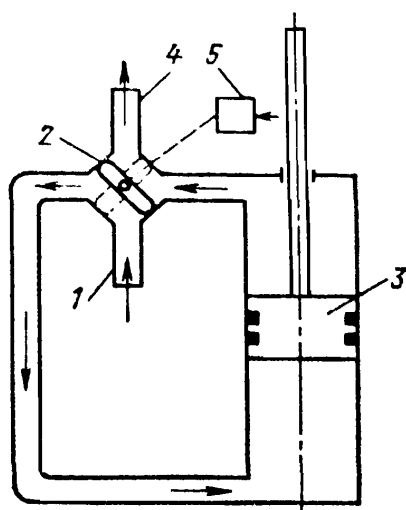
1- термометр сопротивления; 2- блок электронный БЭ-017-01; 3- датчики пьезоэлектрические; 4- датчик давления ДИ-017; 5- коробка распределительная КР-001-01; 6- источник питания ЕА- PS; 7- барьер искрозащитный БИЗ-002; К1, К2, К3- кабели связи.

2.4. Объемные счетчики количества вещества

К числу этих средств относятся счетчики поршневые, дисковые, шестеренчатые, роторные и мембранные. Для измерения газообразных сред в основном используются роторные и мембранные счетчики для жидких же сред – поршневые, шестеренчатые и др.

Среди *поршневых* расходомеров и счетчиков существует несколько конструкций. Наиболее распространенными являются приборы с одним и. четырьмя поршнями. Для ознакомления с принципом работы поршневого счетчика рассмотрим упрощенную схему устройства одиопоршневого прибора, показанную на рис. 2.17. Жидкость из трубы 1 через

распределительный четырехходовой кран 2 поступает под поршень 3 и поднимает его. Поршень, перемещаясь вверх, вытесняет жидкость, находящуюся в верхней полости цилиндра, через распределительный кран в трубу 4. При достижении поршнем верхнего крайнего положения, четырехходовой кран, связанный специальным механизмом 5 со штоком поршня, перемещается в положение, показанное на рисунке пунктиром. Благодаря этому жидкость из трубы 1 будет поступать в верхнюю полость цилиндра, а поршень начинает перемещаться вниз и из нижней полости жидкость вытесняется через четырехходовой кран и трубу 4. С момента достижения поршнем крайнего положения цикл повторяется.



**Рис. 2.17 – Схема
однопоршневого счетчика
жидкости**

Количество жидкости, прошедшее через счетчик за определенный промежуток времени, определяется по счетному механизму, связанному с помощью передаточного механизма со штоком поршня.

Для поршневых счетчиков по сравнению с другими типами объемных счетчиков характерна большая потеря давления. Поршневые счетчики используются в основном для измерения суммарного количества вязких жидкостей (например, мазута и нефти).

Эти счетчики выпускаются с верхними пределами измерения от 50 до 4000 л/ч. Рабочее давление измеряемой среды должно быть не более 10 кгс/см^2 (1 МПа), температура ее от 10 до 100°C . Наибольшая потеря давления в счетчике не превышает $0,35 \text{ кгс/см}^2$ (0,035 МПа), а пределы допускаемой основной погрешности суммирования $\pm 1\%$.

2.4.1. Мембранные счетчики газа

Мембранный (диафрагменный, камерный) счетчик газа, принцип действия которого основан на том, что при помощи различных подвижных

преобразовательных элементов газ разделяют на доли объема, а затем производят их циклическое суммирование.

Диафрагменный счетчик (см. рис.2.18) состоит из корпуса 1, крышки 2, измерительного механизма 3, кривошипно-рычажного механизма 4, связывающего подвижные части диафрагм (мембран) с верхними клапанами 5 газораспределительного устройства, седел клапана (нижняя часть распределительного устройства) и счетного механизма.

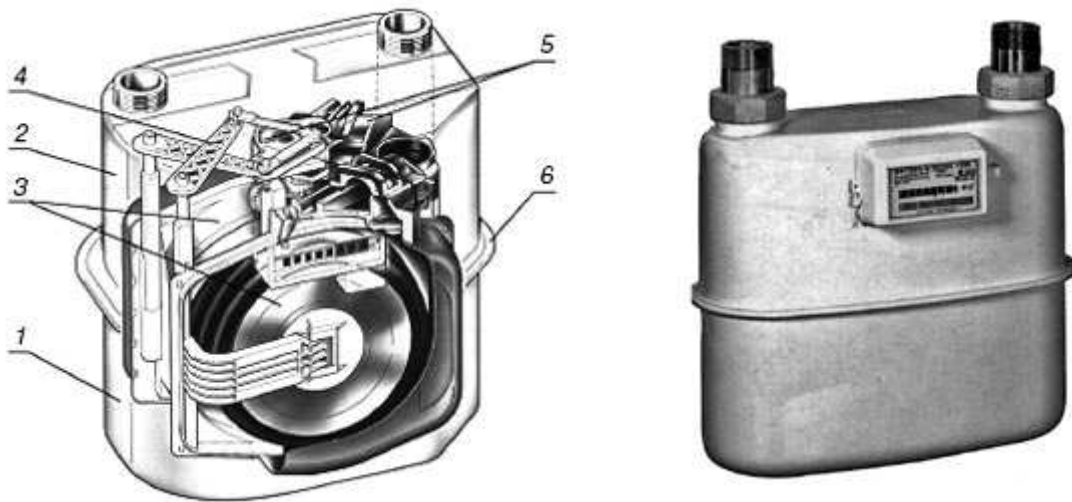


Рис. 2.18 - Мембранный счетчик газа

1- корпус; 2- крышка; 3- измерительный механизм; 4- кривошипно-рычажной механизм; 5- верхние клапаны газораспределительного устройства; 6- стяжная полоса.

Корпус и крышка счетчика могут быть:

- стальными, штампованными с покрытием против коррозии и искрообразования. Соединение стального штампованного корпуса и крышки осуществляется посредством герметизирующего материала и стяжной полосы 6 (см. рис. 88), которые обеспечивают плотное прилегание двух частей друг к другу;
- алюминиевыми, литыми. Корпус и крышка счетчика в алюминиевом исполнении герметично закрываются при помощи специальных прокладок и комплекта винтов, один из винтов выполнен с пломбой.

Детали и узлы измерительного механизма для мембранных счетчиков изготавливают из пластмасс. Применение пластмассовых измерительных механизмов значительно снижает себестоимость продукции, увеличивает

стойкость к воздействию химических компонентов, находящихся в газах, значительно уменьшает коэффициент трения в движущихся частях счетчика. В зависимости от конструкции и объемов измеряемого газа измерительный механизм может состоять из двух или четырех камер.

Принцип и порядок работы счетчика показан на рис. 2.19 и в табл. 2.2.

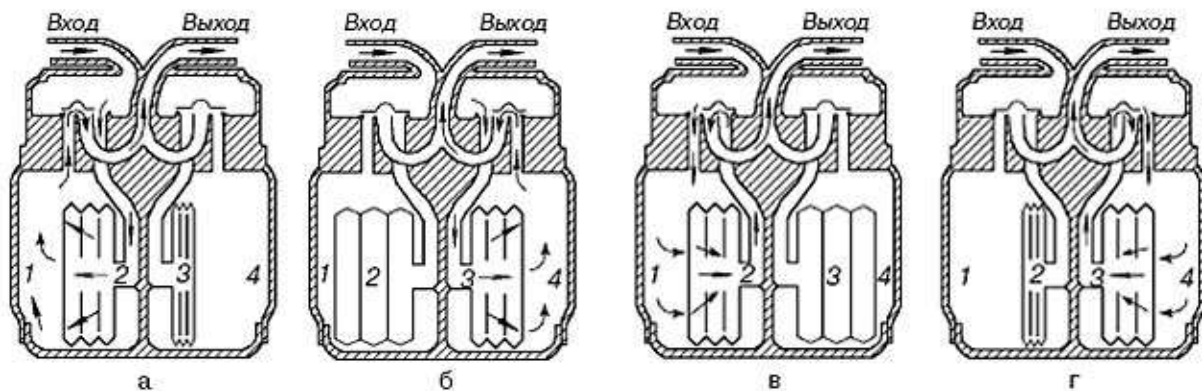


Рис. 2.19 - Принцип работы диафрагменного счетчика газа

Таблица 2.2.

Порядок работы мембранного счетчика газа.

Положение камер счетчика (рис. 5.3)	Камера 1	Камера 2	Камера 3	Камера 4
а	Опустошается	Наполняется	Пуста	Наполнена
б	Пуста	Наполнена	Наполняется	Опустошается
в	Наполняется	Опустошается	Наполнена	Пуста
г	Наполнена	Пуста	Опустошается	Наполняется

Счетчик работает следующим образом:

а - Измеряемый поток газа через входной патрубок поступает в верхнюю полость корпуса и далее через открытый клапан в камеру 2. Увеличение объема газа в камере 2 вызывает перемещение диафрагмы и вытеснение газа из камеры 1 на выход из щели седла клапана и далее в выходной патрубок счетчика. После приближения рычага диафрагмы к стенке камеры 1 диафрагма останавливается в результате переключения клапанных групп. Подвижная часть клапана камер 1 и 2 полностью перекрывает седла клапанов этих камер, отключая этот камерный блок.

б - Клапан камер 3 и 4 открывает вход газа из верхней полости корпуса счетчика в камеру 3, наполняет ее, что вызывает перемещение диафрагмы и

вытеснение газа из камеры 4 в выходной патрубок через щели в седле клапана. После приближения рычага диафрагмы к стенке камеры 4 диафрагма останавливается в результате отключения клапанного блока камер 3, 4.

в - Клапан камер 1, 2 открывает вход газа из верхней полости корпуса счетчика в камеру 1. При подаче газа в камеру 1 диафрагма 1, 2 перемещается и вытесняет газ из камеры 2 в выходной парубок через щели в седле клапана. После приближения рычага диафрагмы к стенке камеры 2 диафрагма останавливается в результате отключения клапанного блока камер 1, 2.

г - Клапан камер 3, 4 открывает вход газа из верхней полости корпуса счетчика в камеру 4. При подаче газа в камеру 4 диафрагма 3, 4 перемещается и вытесняет газ из камеры 3 в выходной патрубок через щели в седле клапана. После приближения рычага диафрагмы к стенке камеры 3 диафрагма останавливается в результате отключения клапанного блока 3, 4.

Процесс повторяется периодически. Счетный механизм подсчитывает число ходов диафрагм или число циклов работы измерительного механизма. За каждый полный цикл через счетчик вытесняется объем газа, равный сумме объемов камер 1, 2, 3 и 4. Один полный оборот выходной оси измерительного механизма соответствует 16-ти циклам.

2.4.2. Ротационные счетчики газа

В связи с увеличением видов оборудования возникла необходимость в измерительных приборах, которые обладали бы сравнительно большой пропускной способностью и значительным диапазоном измерений при сравнительно небольших габаритных размерах. Этим условиям удовлетворяют ротационные газовые счетчики, которые обладают дополнительно следующими достоинствами: долговечность, возможность контроля исправности работы по перепаду давления на счетчике во время его работы, нечувствительность к кратковременным перегрузкам. Ротационные счетчики широко применяют в коммунальном хозяйстве, особенно для отопительных котельных, а также на небольших и средних предприятиях и в быту.

Ротационный (роторный) счетчик газа - камерный счетчик, в котором в качестве преобразовательного элемента применяются два восьмиобразных ротора. Схема и общий вид ротационного счетчика газа приведена на рис.2.20.

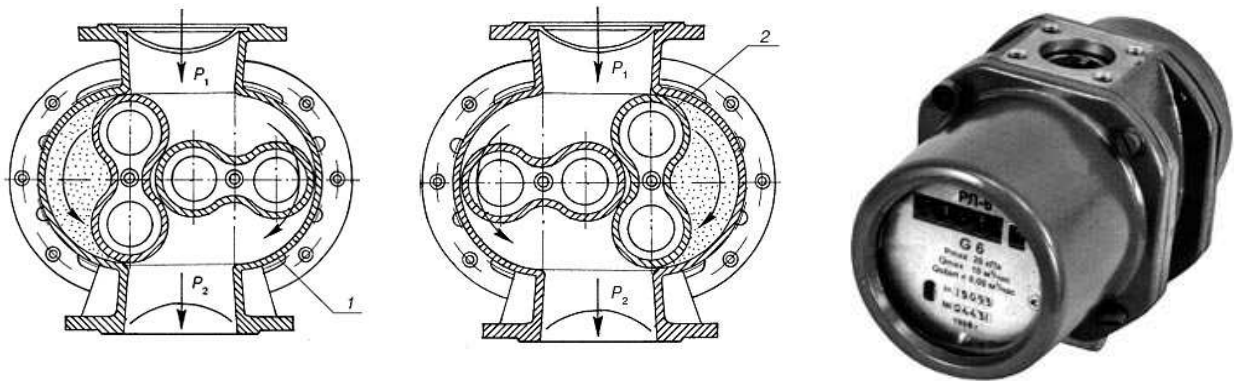


Рис. 2.20 - Ротационный счетчик газа типа РГ

1- корпус; 2- ротор.

Ротационный газовый счетчик типа РГ состоит из корпуса 1, внутри которого вращаются два одинаковых восьмиобразных ротора 2 передаточного и счетного механизмов, связанных с одним из роторов. Роторы приводятся во вращение под действием разности давлений газа, поступающего через верхний входной патрубок и выходящего через нижний выходной патрубок. При вращении роторы обкатываются своими боковыми поверхностями. Синхронизация вращения роторов достигается с помощью двух пар одинаковых зубчатых колес, укрепленных на обоих концах роторов в торцевых коробках вне пределов измерительной камеры-корпуса. Для уменьшения трения и износа шестерни роторов постоянно смазываются маслом, залитым в торцевые коробки.

Объем газа, вытесненный за пол-оборота одного ротора, равен объему, ограниченному внутренней поверхностью корпуса и боковой поверхностью ротора, занимающего вертикальное положение. За полный оборот роторов вытесняются четыре таких объема.

При изготовлении ротационных счетчиков особое внимание обращается на легкость хода роторов и уменьшение неучтенных утечек газа через счетчик. Легкость хода, являющаяся качественным показателем малого трения в механизме, а, следовательно, и малой потери давления в счетчике, обеспечивается установкой валов роторов на шариковые подшипники, сведением до минимума трения в редукторе и счетном механизме, а также рациональным выбором конструктивных размеров и частоты вращения роторов. Уменьшение утечек газа достигается тщательной обработкой и взаимной подгонкой внутренней поверхности корпуса и трущихся поверхностей роторов. Зазор между корпусом и прямоугольными площадками, расположенными на концах наибольших диаметров роторов, колеблется от 0,04 до 0,1 мм в зависимости от типа счетчика. При изготовлении счетчиков особое внимание уделяется статической балансировке и обработке роторов.

2.5. Массовые расходомеры

К массовым расходомерам, а следовательно, и к счетчикам количества относятся приборы учета, в основу которых заложен принцип непосредственного взвешивания вещества, проходящего в единицу времени или косвенного измерения действия массы потока вещества на соответствующий преобразователь. К таким приборам учета относятся вихревые, кориолисовые, тепловые расходомеры, а также щелевые расходомеры непосредственного взвешивания. Использование массовых расходомеров при коммерческом учете энергоносителей дает их неоспоримое преимущество в точности за счет отсутствия необходимости в дополнительном измерении плотности, температуры, давления и вязкости измеряемой среды.

2.5.1 Вихревые расходомеры

Принцип действия вихревых расходомеров заключается в генерации вихрей в потоке при помощи некоторого тела обтекания, помещенного в

поток, и последующей фиксацией за телом обтекания. При этом частота срыва (следования) вихрей пропорциональна расходу измеряемой среды в широком диапазоне чисел Рейнольдса жидкости или газа.

Известно, что в ядре вращающегося потока распределение давлений определяется выражением:

$$p_{\infty} - p_0 = \frac{\rho \cdot \omega^2}{2} (r_0^2 - 2 \cdot r_m^2), \quad (2.20)$$

где $p_{\infty} - p_0$ - разность давлений от края вращающегося потока до его центра;

r_0 — радиус патрубка, формирующего вращающийся поток;

r_m — радиус ядра вихря;

$\omega = v/r_m$ -угловая частота движения ядра вращающегося потока;

v – линейная скорость движения потока.

Измеряя разность давлений во внешней и внутренней областях вращающегося потока и связывая ее с выходной частотой прибора, пропорциональной объемному расходу, найдем значения массового расхода. Здесь ядро вихря совершает в расширяющейся области прибора прецессионное движение вокруг оси прибора. При вращении оно соприкасается своей центральной областью с воспринимающими элементами преобразователей давления и создает на последних импульсы давления, максимальная амплитуда которых, согласно формуле (2.20), равна $\rho \cdot \omega^2 \cdot r_m^2$. Частота выходного сигнала пропорциональна объемному расходу. Если посредством вычислительного устройства поделить значение амплитуды импульсов на их частоту, то получится массовый расход, связанный с объемным расходом по известной зависимости:

$$Q_m = k \cdot \rho \cdot Q_o,$$

где ρ - плотность измеряемой среды;

k - масштабный постоянный коэффициент.

Если измеряемая среда сжимаема, то

$$\rho = \rho_0 \cdot (p/p_0)^{1/\chi}$$

где χ - показатель адиабаты.

При этом в ядре вихря наблюдается понижение плотности, а во внешней области - ее повышение. Помимо передачи кинетической энергии вращения от внешней области к внутренней, происходит интенсивный турбулентный теплообмен, в процессе которого тепло из ядра вихря передается в периферийные слои.

Колебания давления, создаваемые прецессией вращающегося потока, воспринимаются преобразователями давления с пьезоэлектрическими чувствительными элементами и затем преобразуются в выходное пропорциональное напряжение электрического тока.

На рис. 2.21 приведена принципиальная схема вихревого массового расходомера.

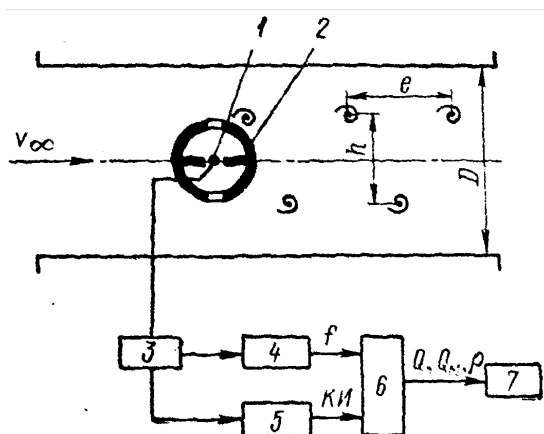


Рис. 2.21 - принципиальная схема вихревого расходомера

1- преобразователь съема сигнала; 2- генератор вихрей; 3- блок формирования сигналов преобразователя; 4-счетчик импульсов; 5- блок измерения амплитуды сигнала; 6- вычислительное устройство; 7- регистрирующий прибор

В данном расходомере в качестве тела обтекания использован полый цилиндр, расположенный внутри технологического трубопровода перпендикулярно оси потока. Цилиндр снабжен внутренней перегородкой с отверстием и продольными прорезями по образующим. Для измерения массового расхода в перегородке возле отверстия расположен чувствительный элемент.

Процессы вихреобразования вызывают знакопеременный переток измеряемой среды между продольными прорезями внутри цилиндра. Во время перетоков, под действием динамического напора движущегося потока пьезоэлемент вырабатывает импульсы с частотой вихреобразования, которая

пропорциональна расходу. Амплитуда же импульсов пропорциональна плотности измеряемого потока. Таким образом, каждый электрический импульс, вырабатываемый чувствительным элементом, одновременно дает информацию об объемном и массовом расходах, а также плотности потока.

Высокая точность измерения, надежность, долговечность и простота конструкции ставят вихревые счетчики-расходомеры в ряд одних из лучших измерительных приборов.

В настоящее время выпускаются вихревые расходомеры с электромагнитным узлом съема сигнала и ультразвуковыми датчиками. В случае применения электромагнитного узла съема сигнала (для расходомеров жидких сред), в теле обтекания делается отверстие и вблизи нее в теле по перпендикулярным диаметрам располагаются два постоянных магнита и два электрода, электрически изолированные от проточной части отверстия. По сути, такой датчик преобразования пульсаций представляет собой маленький электромагнитный расходомер с постоянными магнитами. Использование этого принципа для вихревого расходомера позволило устранить поляризацию электродов, т.к. в этом случае измеряется пульсирующий поток, постоянные же магниты не требуют электрического питания, а электронные компоненты в электронных блоках потребляют мало энергии.

Выпускаются следующие марки вихревых расходомеров с электромагнитным преобразователем сигнала: **ВПС, ВЭПС-ПБ** и др.

В случае использования ультразвуковых датчиков поток просвечивается за телом обтекания, где фиксируются вихреобразования. Электронный блок у такого вихревого расходомера гораздо проще, чем у времяпролетного ультразвукового расходомера, поэтому эти приборы более дешевые.

Выпускаются следующие марки вихревых расходомеров с ультразвуковым преобразованием сигнала: **СВУ, Метран-300ПР** и др.

На рис. 2.22 приведены общий вид ультразвукового расходомера и сравнительные технические характеристики.



Наименование	Ду, мм	Диапазон измерений, куб.м/ч
ВПС ВЭПС-ПБ	20	0,1-10,0 0,3-8,0
ВПС ВЭПС-ПБ Метран-300 ПР-25	25	0,15-15 0,4-10 0,18-9,0
ВПС ВЭПС-ПБ Метран-300 ПР-32	32	0,2-20,0 0,5-16,0 0,25-20,0
ВПС ВЭПС-ПБ	40	0,3-30,0 0,8-25,0
ВПС ВЭПС-ПБ Метран-300 ПР-50	50	0,5-50,0 1,0-32,0 0,4-50,0
ВЭПС-ПБ	65	0,8-80,0
ВПС ВЭПС-ПБ Метран-300 ПР-80	80	1,5-150,0 2,5-80,0 1,0-120,0
ВПС ВЭПС-ПБ Метран-300 ПР-100	100	2,0-200,0 5,0-160,0 1,5-200,0
ВЭПС-ПБ	125	3,0-300,0
ВПС ВЭПС-ПБ Метран-300 ПР-150	150	5,0-500,0 12,5-400,0 5,0-400,0
ВПС ВЭПС-ПБ Метран-300 ПР-200	200	12,0-1200,0 25,0-630,0 6,0-700,0
ВЭПС-ПБ	250	32,0-1000,0
ВЭПС-ПБ	300	50,0-1600

Рис. 2.22- Вихревой расходомер (общий вид и сравнительные характеристики)

2.5.2. Кориолисовые расходомеры

В основу работы данных расходомеров заложен эффект, открытый Густавом Кориолисом в 1830 году. Проявляется этот эффект как воздействие сил инерции вращающейся системы отсчета на движущийся относительно нее материальный объект. За последние 20 лет использование эффекта Кориолиса при измерении расхода жидкости и газа приобрело широкое распространение. С тех пор, появилось множество различных конструкций массовых расходомеров. С развитием способов обработки электрических сигналов кориолисовы расходомеры стали высокоточным и надежным измерительным оборудованием.

Массовый расходомер представляет особый интерес благодаря базовому принципу измерений массы потока непосредственно, без предварительного

замера плотности и объема. Измерения на основе кориолисовых сил не зависят от физических характеристик измеряемой среды (вязкости, температуры, давления и электропроводимости). Данные приборы обладают высокой точностью измерения в широком диапазоне расходов измеряемой среды, нечувствительны к вибрациям в трубопроводах, обладают стойкостью к механическому износу и коррозии.

Комплект расходомера состоит из первичного преобразователя (врезной секции на фланцах, монтируемой непосредственно в трубопровод) и электронного блока.

В основу конструкции преобразователя любого кориолисова расходомера входит изогнутая трубка в виде синусоиды или Ω -образной петли. Эта трубка заполнена измеряемой средой с определенной массой вещества. Пока трубка неподвижна, на массу в трубке действует только сила тяжести. Если раскачивать эту трубку как маятник вокруг её продольной оси, то часть среды, которая находится в изогнутом сегменте, начинает двигаться по дуге - т.е. с центростремительным ускорением и на среду начнет действовать центробежная сила. После создания напора измеряемая среда будет перемещаться по трубке. В результате закона сохранения момента движения на поток среды (относительно трубки) начнет действовать ускорение Кориолиса и, следовательно, на стенки трубки будет давить сила. Поскольку трубка качается изначально, то эта сила будет действовать вдоль изогнутой трубки неравномерно. И вдоль трубки пойдут поперечные колебания, которые будут перпендикулярны потоку измеряемой среды. Эти колебания можно зарегистрировать пьезодатчиком. Причём, по частоте колебаний и сдвигу фаз относительно их источника можно судить о массе и скорости протекающей жидкости. Учитывая, что объём трубки, является величиной постоянной, то можно еще определить плотность среды, как отношение ее массы в трубке к объёму.

Таким образом, кориолисов расходомер первично измеряет не объём жидкости, а именно массу. В этом состоит основное отличие кориолисова расходомера от большинства других средств измерения расхода.

На практике, многие расходомеры имеют две параллельные «качающиеся» трубки. Это сделано с целью лучшей балансировки узла измерения. Хотя, есть и дешёвые однотрубные приборы. Необходимо

отметить, что трубка вибрирует с достаточно высокой частотой (сотни герц). При такой частоте колебаний прибор совершенно нечувствителен к внешним низкочастотным механическим воздействиям типа ударов по корпусу и т.п.

Номенклатура массовых расходомеров характеризуется широким диапазоном размеров, пригодных для применения в различных рабочих условиях без ухудшения их эксплуатационных характеристик. Большая серия расходомеров адаптирована по своим физическим параметрам и принципу действия для работы как при экстремально низких расходах от 0,001 кг/мин, так и при высоких - до 25000 кг/мин для трубопроводов диаметром от 15 мм до 300мм. Класс точности для большинства кориолисовых расходомеров обеспечивает точность измерений с ошибкой не более 1% в комплекте с электронным блоком и вторичным прибором.

Массовые расходомеры рассчитаны на рабочую температуру от -255 °С до +400 °С и давление до 900 бар. Все счетчики могут устанавливаться во взрывоопасных зонах, т.к. они имеют соответствующую защиту и проходят сертификацию. Эти приборы могут быть использованы для коммерческого учета.

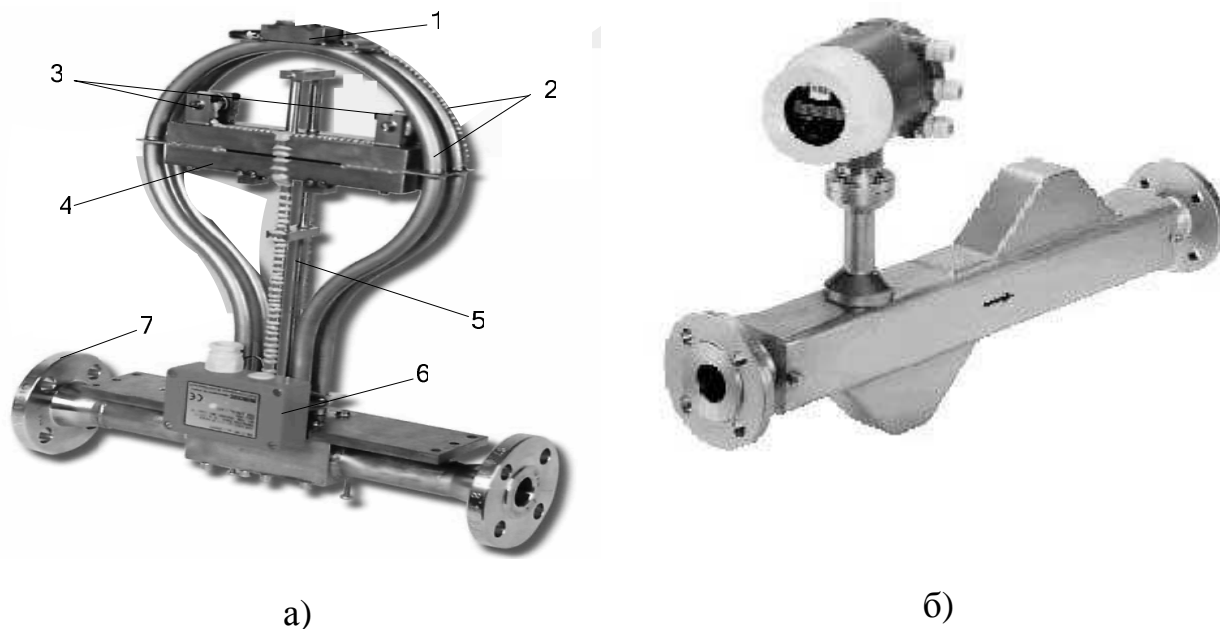


Рис. 2.23 – Кориолисовы расходомеры

а- с Ω -образной трубкой; б- с синусоидальной трубкой

1- измерительные катушки; 2- измерительные трубки; 3- приводные катушки; 4- элемент массы; 5- торсионный стержень; 6- распределительная коробка; 7- подключающие фланцы

2.5.3. Тепловые расходомеры

В настоящее время получили распространение тепловые расходомеры. Принцип их действия основан на использовании зависимости эффекта теплового воздействия на поток вещества от массового расхода этого вещества. Различают калориметрические, расходомеры пограничного теплового слоя и термоанемометрические расходомеры. Калориметрические расходомеры основаны на нагреве или охлаждении потока посторонним источником энергии, создающим в потоке разность температур. Расходомеры теплового слоя, основанные на создании разности температур с двух сторон пограничного слоя. В основу работы термоанемометрических расходомеров положена зависимость между количеством теплоты, теряемой непрерывно нагреваемым телом, помещенным в поток, и массовым расходом вещества.

Прибор для измерения скорости потока жидкости или газа, принцип действия которого основан на зависимости между скоростью потока и теплоотдачей чувствительного элемента (ЧЭ), помещенного в поток и нагретого электрическим током, называют термоанемометром. Термоанемометры обладают малой инерционностью, высокой чувствительностью, точностью и компактностью. Основной областью применения термоанемометров является изучение неустановившихся движений и течений в пограничном слое вблизи стенки, а также для коммерческого учета.

Основная часть термоанемометра – измерительный мост (см. рис. 2.24), в одно плечо которого включен ЧЭ. Количество тепла, передаваемое нагретым ЧЭ потоку жидкости (газа), зависит от физических характеристик движущейся среды, геометрии и ориентации ЧЭ. С увеличением температуры ЧЭ чувствительность термоанемометра увеличивается.

Термоанемометры принято различать по ряду признаков: тепловому режиму преобразователя; способу нагрева чувствительного элемента (прямой, косвенный, непрерывный, импульсный); роду рабочего тока (постоянный, переменный); принципам построения электрической схемы и др.

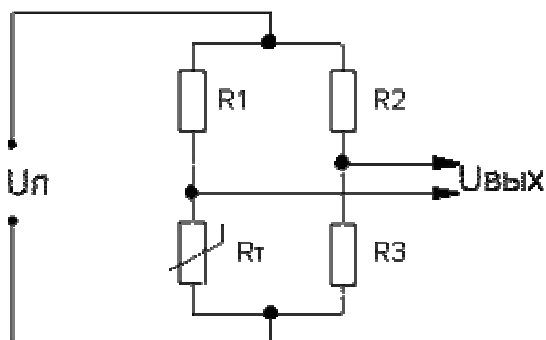


Рис. 2.24 - Измерительный мост термоанемометра

В зависимости от теплового режима преобразователя различают термоанемометры постоянного тока и постоянной температуры. В термоанемометрах постоянного тока (см. рис. 2.25) сила тока, протекающего в цепи чувствительного элемента преобразователя, остается неизменной при различных скоростях течения.

Питание моста в таком термоанемометре осуществляется с помощью источника с очень большим внутренним сопротивлением, что обеспечивает постоянство величины тока при изменении сопротивления ЧЭ. Так как температура ЧЭ изменяется во времени, то при измерениях в нестационарных и турбулентных потоках полоса регистрируемых частот ω оказывается ограниченной из-за тепловой инерции ЧЭ, вследствие чего амплитуда сигнала при высокочастотных пульсациях уменьшается в $\sqrt{1+(\omega\tau)^2}$ раз, где τ – постоянная времени ЧЭ.

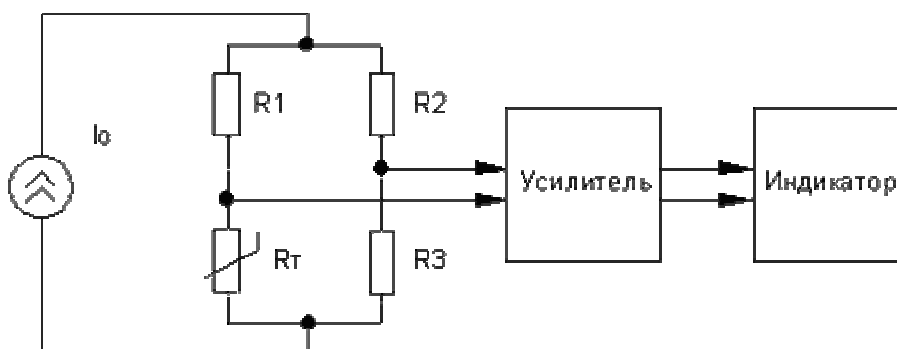


Рис. 2.25 – Схема термоанемометра постоянного тока

Применение усилителей с частотной коррекцией значительно расширяет частотный диапазон термоанемометра постоянного тока. Путем согласования частотных характеристик усилителя и преобразователя можно добиться полного устранения искажений сигнала за счет тепловой инерции. Однако

практически осуществить такую коррекцию крайне трудно, вследствие зависимости частотной характеристики не только от физических свойств ЧЭ, но и от скорости течения и других параметров, поэтому в процессе измерений необходимо производить подстройку компенсирующей цепи усилителя. При малой интенсивности пульсаций частотную коррекцию можно выполнить по средним значениям параметров. Если уровень пульсаций достаточно высок, то такая компенсация не обеспечивает коррекции частотной характеристики. Поэтому термоанемометры постоянного тока применяются, как правило, только для измерения в потоках с низким уровнем пульсаций.

В последние годы широкое распространение получили термоанемометры постоянной температуры (см. рис. 2.26). Основными элементами таких термоанемометров являются измерительный мост с чувствительным элементом, включенным в одно из его плеч, и усилитель с обратной связью. Усилитель постоянного тока должен иметь высокий коэффициент усиления (не менее 8000...10000) и равномерную частотную характеристику в полосе частот 0-30 кГц. Устойчивая работа усилителя в области высоких частот обеспечивается благодаря частотно-зависимой обратной связи.

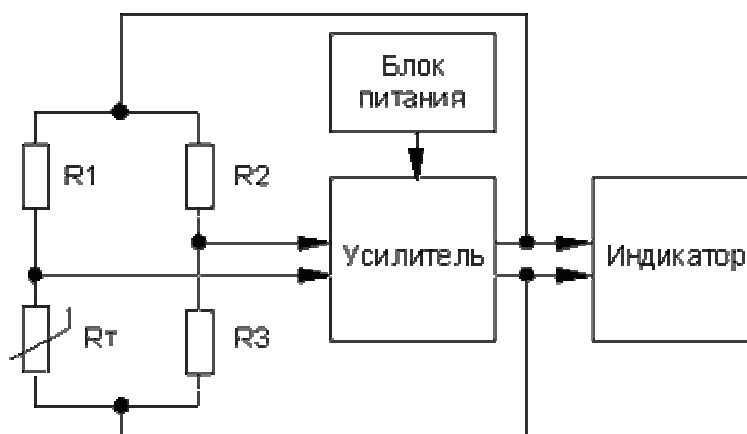


Рис. 2.26 – Схема термоанемометра постоянной температуры

Изменение фактора обратной связи позволяет регулировать в широких пределах частотную характеристику прибора.

Однако, несмотря на ряд достоинств (малая инерционностью, высокая чувствительность, точность, надежность, компактность), термоанемометр постоянной температуры обладает существенным недостатком – зависимостью показаний от температуры среды. Это обуславливает необходимость применения в канале измерения температуры второго чувствительного элемента, что несколько усложняет схему прибора, а влияние одного чувствительного элемента на другой дополнительно повышает погрешность измерения. Следует также отметить, что градуировка термисторов, которые используются в термоанемометре в качестве чувствительных элементов, весьма трудоемкий процесс. Поэтому она выполняется в ограниченном диапазоне температур, тогда как реальный диапазон рабочих температур значительно шире. Это может привести к существенному увеличению погрешности измерения в тех случаях, когда температура жидкости или газа, скорость которых измеряется, выходит за пределы диапазона, в котором выполнялась градуировка ЧЭ.

В связи с этим получили применение импульсные термоанемометрические преобразователи массового расхода. При этом показания прибора практически не зависят от изменения температуры газа или жидкости, скорость которых измеряется.

Известен также расходомер тепловой неконтактный (РТН), у которого отсутствует непосредственный контакт измеряемой среды с чувствительными элементами термопреобразователя, отсутствуют механические подвижные части и т.д. Этот прибор отличается относительной простотой и дешевизной конструкции, возможностью осуществления коррекции по температуре и плотности измеряемой среды, широким динамическим диапазоном измерений, а также имеют возможность измерения расходов агрессивных сред. Схема такого расходомера приведена на рис 2.27.

Принцип действия расходомера заключается в следующем. На измерительной тонкостенной трубке 1 находятся чувствительный 2 и компенсационный 3 термоэлементы, представляющие собой обмотки из

медного провода, которые включены в мостовую схему. На поверхности термочувствительного элемента находится обмотка импульсного нагревателя 4, который управляется генератором тепловых меток 10 по сигналам от пороговых устройств 8 и 9. При включении напряжения питания расходомера чувствительный элемент нагревается до температуры T_v , задаваемой пороговым устройством верхнего предела температуры, после чего нагреватель отключается и чувствительный элемент охлаждается за счет теплопередачи через стенку измерительной трубки и конвективного теплообмена в пограничном слое измеряемой среды.

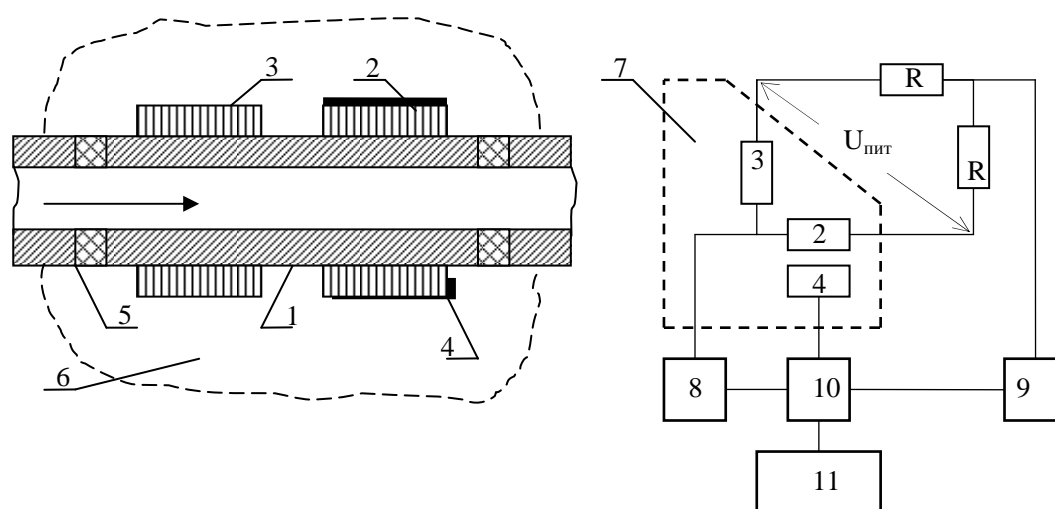
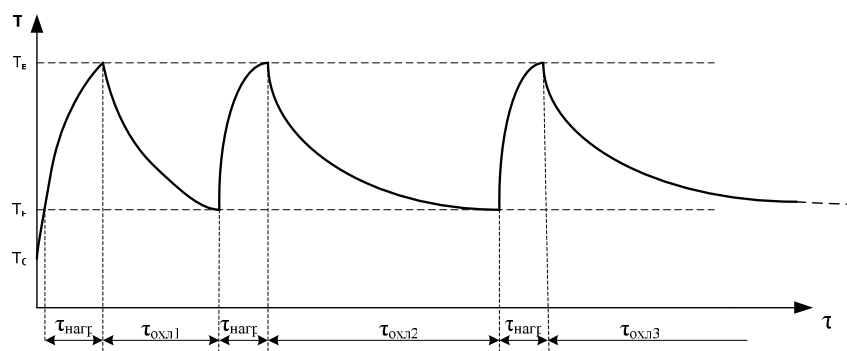


Рис. 2.27- Расходомер типа РТН

1-измерительная трубка; 2- термочувствительный элемент; 3-термокомпенсационный элемент; R-уравновешивающие плечи измерительного моста; 4- нагревательный элемент; 5- теплоизолирующие вставки; 6-тепловая изоляция; 7-тепловая камера; 8,9-устройства сравнения верхнего и нижнего пределов температуры; 10-генератор тепловых меток; 11-устройство преобразования и отображения информации.

При достижении температуры чувствительного элемента значения T_n , задаваемой пороговым устройством нижнего предела температуры произойдет включение нагревателя и процесс повторится. Таким образом, частота включений нагревателя и время охлаждения чувствительного элемента от T_v до T_n будут пропорциональны массовому расходу измеряемой среды: $\tau_{охл} = \Psi(G)$ или $f_{вкл} = (\tau_{нагр} + \tau_{охл})^{-1} = \Psi(G)$. Циклы работы расходомера ТНР представлены на следующей диаграмме:



Тепловые расходомеры по своей сути предназначены для измерения малых расходов до 30 л/ч. Для измерения больших расходов измеряют не весь поток Q , а лишь его часть Q_1 , которую пропускают по измерительной трубке расходомера. Эта трубка шунтирует участок технологического трубопровода, на котором устанавливается дроссель. Проходное сечение дросселя определяет верхнюю границу диапазона измеряемых расходов: чем больше это сечение, тем большие расходы можно измерять (при той же мощности нагревателя).

2.5.4. Щелевой расходомер

Щелевые расходомеры предназначены для измерения массового расхода жидких сред путем непосредственного взвешивания. Такие расходомеры получили также название приборов постоянного уровня. Их первичные преобразователи представляют собой камеры (емкости) с устройствами ввода в них жидкости и отверстиями для ее истечения, у которых мерой расхода служит масса (вес) содержимого камеры.

Для обеспечения линейной зависимости между величиной расхода и весом содержимого камеры у преобразователей должна соблюдаться определенная зависимость между формой отверстия истечения и формой камеры преобразователя.

Общее уравнение связи измеряемого расхода с мерой (весом содержимого) линейных преобразователей этого класса имеет вид:

$$Q_m = B_i \cdot \alpha_i \cdot G_{ki} \cdot \sqrt{2g}, \quad (2.21)$$

где Q_m - массовый расход жидкости;

B_i - коэффициент, характеризующий конструктивные особенности i -го типа преобразователя (коэффициент формы);

a_i - коэффициент расхода i -го типа преобразователя;

G_{ki} - вес содержимого камеры i -го типа преобразователя.

Выражение коэффициента формы B_i определяется формами отверстий истечения и камер преобразователей.

Теоретически и экспериментально наиболее исследованы преобразователи расхода с отверстиями истечения в одной или обеих параллельно расположенных вертикальных стенках. Схематично камеры таких преобразователей показаны на рис. 2.28.

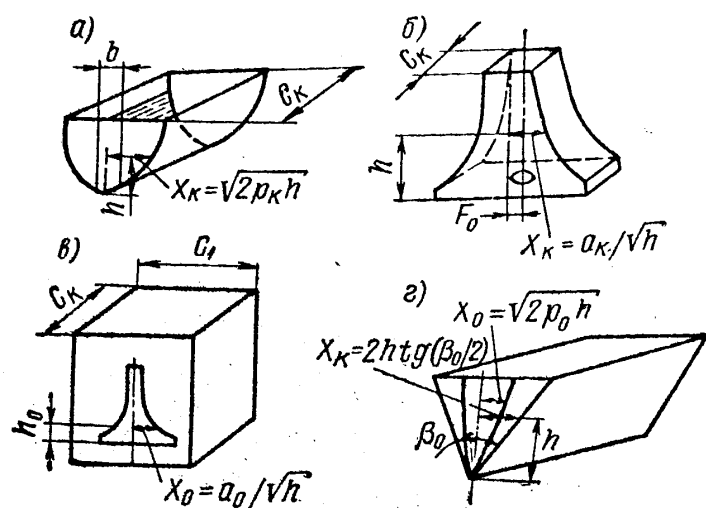


Рис. 2.28 - Схемы преобразователей расхода жидкости непрерывного взвешивания
а- с прямоугольной щелью истечения в вертикальной стенке; **б-** с отверстием в донной части; **в-** с пропорциональной щелью истечения в вертикальной стенке;
г - с параболической щелью истечения в вертикальной стенке

Для обеспечения линейной зависимости между измеряемым расходом и весом содержимого камеры преобразователь с прямоугольным отверстием истечения в вертикальной стенке (рис. 2.28-а) должен иметь форму этой стенки в виде параболического сегмента; если отверстие расположено в донной части камеры преобразователя (рис. 2.28-б), то вертикальные стенки должны иметь переменную по высоте ширину X в соответствии с формулой $X = a \cdot \sqrt{h}$, где $a = \text{const}$; h - текущее значение высоты щели.

Если отверстие в вертикальной стенке имеет такую форму (рис. 2.8-в), то вертикальные стенки должны иметь прямоугольную форму; если отверстие

имеет параболическую форму, то вертикальная стенка должна иметь форму треугольника с вершиной, обращенной вниз (рис. 2.28-г).

Коэффициенты формы для изображенных на рис. 2.28 преобразователей выражаются следующими формулами:

$$B_1 = \frac{3 \cdot b \cdot \sqrt{h}}{C_{\kappa} \cdot X_{\kappa}}; \quad (2.22)$$

$$B_2 = \frac{F_0}{2 \cdot G_{\kappa} \cdot X_{\kappa} \cdot \sqrt{h}}; \quad (2.23)$$

$$B_3 = \frac{\pi \cdot X_0 \cdot \sqrt{h_0}}{2 \cdot C_{\kappa} \cdot G_{\kappa}}; \quad (2.24)$$

$$B_4 = \frac{X_0 \cdot X_{\kappa}}{4 \cdot C_{\kappa} \cdot h_0^{3/2}}, \quad (2.25)$$

где B_1, B_2, B_3, B_4 - коэффициенты формы преобразователей, приведенных на рис. 2.28 а-г, соответственно;

C_{κ} — расстояние между параллельными вертикальными стенками.

Принципиальная схема щелевого расходомера типа РМЦГ приведена на рис. 2.29.

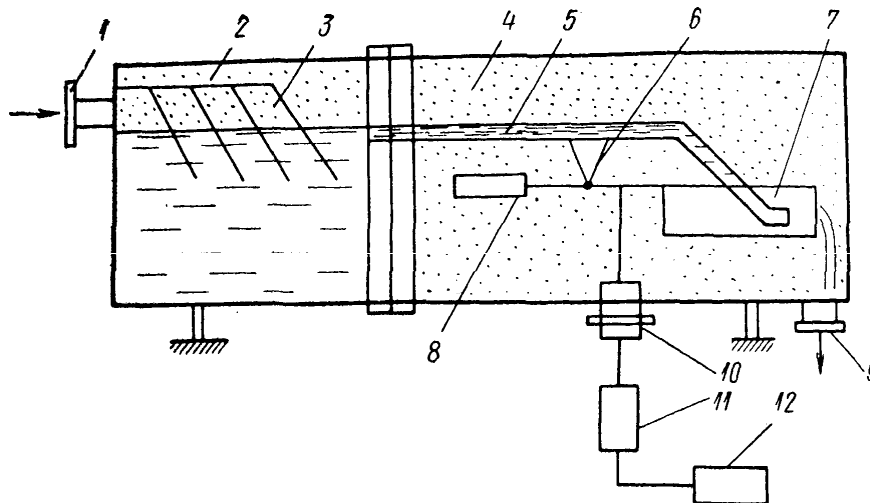


Рис.2.29 - Схема щелевого расходомера для газожидкостного потока

- 1- ввод газожидкостного потока; 2- сепарационная часть; 3 - отбойники;
 4- измерительная камера; 5- лоток для подачи жидкости в первичный преобразователь расхода; 6- шарнирная опора для подвески первичного преобразователя расхода;
 7- измерительная камера первичного преобразователя расхода; 8- противовес; 9- вывод газожидкостного потока; 10- устройство для вывода измерительного сигнала (усилия) и его преобразования в электрический аналоговый сигнал ; 11- частотный преобразователь;
 12- частотный сумматор

Контрольные вопросы

1. Запишите уравнение определения динамического давления при определении скорости потоков, определяемой напорными трубками.
2. На каком расстоянии от наконечника комбинированной трубки Пито рекомендуется размещать отверстия приемника статического давления измеряемого потока?
3. Какой метод измерения расхода заложен в основу напорных трубок?
4. Какие из известных Вам расходомеров относятся к приборам постоянного перепада давления?
5. В каких приборах измерения расхода и количества вещества используется скоростной принцип измерения?
6. Какого типа турбины используются в турбинных расходомерах?
7. Для измерения расхода каких сред используются электромагнитные расходомеры?
8. К какому типу относятся расходомеры с поворотным крылом?
9. Опишите принцип работы ультразвукового расходомера.
10. Перечислите типы приборов учета, для которых используется объемный принцип измерения?
11. Какие известные Вам типы расходомеров и счетчиков количества вещества относятся к массовым измерителям?
12. Опишите принцип работы кориолисовых расходомеров.
13. Почему тепловые расходомеры относятся к массовым расходомерам?
14. Какие расходомеры относятся к приборам постоянного уровня?
15. В каких единицах измеряются объемные и массовые расходы жидких и газообразных энергоносителей?

3. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ ПРИ ПОМОЩИ СУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

3.1. Общие сведения

При измерении расходов жидкостей, газа и пара с помощью сужающих устройств, последние выполняют функцию первичного преобразователя (датчика) скорости потока в перепад давления и устанавливаются в трубопроводах. В месте установки сужающего устройства образуется местное сужение потока вещества, вследствие чего его скорость повышается по сравнению со скоростью до сужения. Увеличение скорости потока приводит к увеличению его кинетической энергии и уменьшению потенциальной в суженном сечении. Следовательно, в соответствии с законом Бернулли, статическое давление в суженном сечении будет меньше, чем в сечении до сужающего устройства. Таким образом, при протекании вещества через сужающее устройство создается перепад давления ΔP , зависящий от скорости потока и, следовательно, расхода вещества.

Полученный на сужающем устройстве перепад давления может быть измерен при помощи различного типа дифманометров, подключаемых к двум отверстиям в трубопроводе, расположенных до и после сужающего устройства.

В качестве сужающих устройств для измерения расхода жидкости, газа и пара широко применяются стандартные диафрагмы, сопла, сопла и трубы Вентури.*

На рис. 3.1 показана диафрагма, представляющая собой тонкий диск с отверстием круглого сечения посередине, центр которого совпадает с осью трубопровода. Сужение потока начинается до диафрагмы и на некотором расстоянии за ней поток достигает максимального сужения. После сужения

* Конструкции и соотношения основных размеров стандартных сужающих устройств приведены в приложении 1.

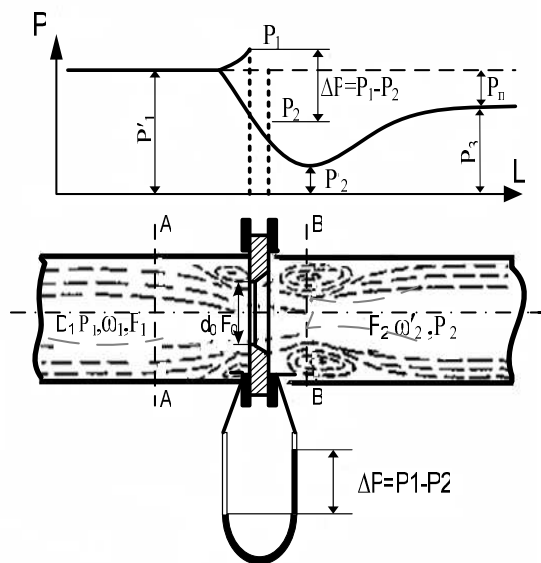


Рис. 3.1 – Диафрагма в трубопроводе

значения P_2 ; в самом узком сечении потока за диафрагмой давление падает до значения P'_2 ; при полном расширении потока после диафрагмы его давление примет значение P_3 . Причем значение давления $P_3 < P_1$ за счет потерь давления, вызванных завихрениями потока после сужающего устройства. Показанный на рис. 3.1 отбор давлений P_1 и P_2 осуществляется до и после диска диафрагмы в углах, образуемых плоскостью диафрагмы и внутренней поверхностью трубопровода, что соответствует угловому способу отбора перепада давления.

Характер распределения давлений в потоке для сопел и труб Вентури аналогичен распределению давлений, показанному на рис.3.1. Однако необходимо принять во внимание, что потери давления на сужающих устройствах при одинаковом перепаде $\Delta P = P_1 - P_2$ уменьшаются в следующем порядке: диафрагма – сопло – сопло Вентури – труба Вентури.

3.2. Уравнения расхода

При математическом анализе движения жидких и газообразных сред через сужающие устройства исходят из уравнения Бернулли и уравнения неразрывности, учитывая при этом сжимаемость (газ, пар) или несжимаемость (жидкость) среды.

поток постепенно расширяется до полного сечения трубопровода. В соответствии с характером потока вещества по трубопроводу с сужающим устройством, распределение давления происходит следующим образом: до начала сужения поток имеет статическое давление P'_1 ; при сужении потока на фронтальной поверхности диафрагмы давление повышается до значения P_1 за счет его торможения; на задней поверхности же диафрагмы давление снижается до значения P_2 ; в самом узком сечении потока за диафрагмой давление падает до значения P'_2 ; при полном расширении потока после диафрагмы его давление примет значение P_3 . Причем значение давления $P_3 < P_1$ за счет потерь давления, вызванных завихрениями потока после сужающего устройства.

Рассмотрим поток между сечениями трубопровода А-А и В-В (рис.3.1), в котором установлена диафрагма, а также примем допущение, что скорости частиц потока по всему сечению равны средней скорости и направлены параллельно оси трубопровода.

Воспользовавшись общим уравнением закона сохранения энергии

$$\int \omega d\omega = -\rho \int dP \quad (3.1)$$

для случая несжимаемой жидкости ($\rho_1 = \rho_2 = \rho = \text{const}$), получим:

$$\frac{\rho}{2} (\omega_2'^2 - \omega_1'^2) = P_1' - P_2' \quad (3.2)$$

где P_1' и P_2' – абсолютные давления в сечениях А-А и В-В соответственно, Па;

ω_1 и ω_2' – средние скорости в соответствующих сечениях А-А и В-В, м/с;

ρ – плотность среды перед сужающим устройством, кг/м³.

Согласно условию неразрывности струи для несжимаемой жидкости, количество вещества, проходящее через любые сечения трубопровода, остается постоянным, тогда

$$F_1 \cdot \omega_1 = F_2 \cdot \omega_2' \quad (3.3)$$

где F_1 и F_2 – площади сечения струи в А-А и В-В, соответственно, м².

Выражая площадь сечения струи F_2 через площадь отверстия сужающего устройства F_0 и коэффициент сужения струи, запишем

$$F_2 = \mu_1 \cdot F_0 \quad (3.4)$$

Подставляя значение F_2 в (3.3), выразим значение скорости ω_1 :

$$\omega_1 = \mu_1 \frac{F_0}{F_1} \cdot \omega_2' \quad (3.5)$$

В этом выражении отношение $\frac{F_0}{F_1} = \frac{d^2}{D^2} = m$ называется относительной площадью или модулем сужающего устройства, здесь d и D – диаметры отверстия сужающего устройства и внутренней части трубопровода при рабочей температуре.

Исходя из выражений (3.5) и (3.2), определим скорость потока в его наиболее узком сечении F_2 :

$$\omega'_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu_1^2 \cdot m^2}} \sqrt{\frac{2 \cdot (P'_1 - P'_2)}{\rho}} \quad (3.6)$$

Однако, как отмечалось выше, перепад давления на диафрагме в основном измеряется в углах до и после нее. Кроме того, в реальном потоке имеет место потеря скорости за счет вязкого трения среды о стенки трубопровода. Поэтому в действительных условиях, а также из-за замены давлений P'_1 и P'_2 давлениями P_1 и P_2 , в формулу (3.6) необходимо ввести поправочный коэффициент ξ и тогда эта формула для средней скорости в наиболее узком сечении потока примет вид:

$$\omega_2 = \frac{\xi}{\sqrt{1 - \mu_1^2 \cdot m^2}} \sqrt{\frac{2 \cdot (P'_1 - P'_2)}{\rho}} \quad (3.7)$$

Отсюда уравнение объемного расхода через отверстие сужающего устройства с учетом выражения (3.4) определится следующим образом:

$$Q_0 = \frac{\mu_1 \cdot \xi}{\sqrt{1 - \mu_1^2 \cdot m^2}} \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}, \quad (3.8)$$

где Q_0 – объемный расход через сужающее устройство, м³/с;

$\Delta P = P_1 - P_2$ – перепад давления на сужающем устройстве, Па.

В случае измерения расхода сжимаемой жидкости, газа или пара необходимо учитывать изменение плотности измеряемой среды в связи с изменением давления при прохождении ее через сужающее устройство. Коэффициент сужения μ_1 для сжимаемой среды зависит от отношения давлений P_2 / P_1 , что влечет увеличение наименьшего сечения струи потока за диафрагмой из-за увеличения объема сжимаемой среды при уменьшении давления за сужающим устройством. Для учета расширения сжимаемой среды за сужающим устройством в уравнение расхода (3.8) необходимо вводить поправочный множитель ε , определение которого будет приведено далее.

Коэффициенты μ_1 и ξ , приведенные в уравнении (3.8), зависят друг от друга и не могут быть с достаточной точностью определены отдельно. Поэтому их объединяют в один общий коэффициент α , называемый коэффициентом расхода сужающего устройства, определяемый по эмпирическим зависимостям, которые будут приведены далее.

$$\alpha = \frac{\mu_1 \cdot \xi}{\sqrt{1 - \mu_1^2 \cdot m^2}} \quad (3.9)$$

Учитывая выражение для коэффициента расхода (3.9) и коэффициент расширения для сжимаемой среды ε , уравнение расхода (3.8) для общего случая может быть переписано в виде:

$$Q_o = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_o \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}, \quad (3.10)$$

причем для несжимаемой жидкости $\varepsilon = 1$.

Массовый расход вещества может быть получен из выражения объемного расхода в соответствии со следующим соотношением:

$$Q_m = Q_o \cdot \rho, \quad (3.11)$$

где Q_m - массовый расход, кг/с:

Q_o - объемный расход, м³/с:

ρ - плотность измеряемой среды, кг/м³.

Выражая площадь отверстия сужающего устройства через его диаметр, запишем общие уравнения объемного и массового расхода, применяемые на практике для коммерческого учета энергоносителей:

$$Q_o = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.12)$$

и

$$Q_m = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot \rho}, \text{ кг/с} \quad (3.13)$$

В этих формулах диаметр сужающего устройства (d) измеряется в метрах.

При коммерческом учете газовых сред их объемный расход, определяемый в соответствии с уравнением (3.12) при рабочих условиях, принято приводить к нормальным условиям (при $P_H = 1,0332$ кгс/см² и $T_H = 293,15$ °K) по следующему выражению:

$$Q_H = Q_0 \cdot \frac{P \cdot T_H}{P_H \cdot T \cdot z}, \quad (3.14)$$

где Q_H – расход газа при нормальных условиях, нм³/с;

P, T - абсолютные давление и температура газа при рабочих условиях;

z – коэффициент сжимаемости газа.

Учитывая постоянство значений давления и температуры для нормальных условий, выражение (3.14) обычно используют в следующем виде:

$$Q_H = 283,73 \cdot Q_0 \cdot \frac{P}{T \cdot z} \quad (1.15)$$

Исходя из соотношения (3.15) и уравнения (3.12), объемный расход сухих газов, приведенный к нормальным условиям, на практике определяется по формуле:

$$Q_H = 0,2109 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot K_t^2 \cdot d_{20}^2 \cdot \sqrt{\frac{P \cdot \Delta P}{\rho_H \cdot T \cdot z}} \quad (\text{нм}^3/\text{час}), \quad (3.16)$$

где ΔP - перепад давления на сужающем устройстве, кгс/м² (мм вод.ст.);

d_{20} – диаметр сужающего устройства при 20 °C, мм;

ρ_H – плотность газа при нормальных условиях, кг/м³;

K_t – коэффициент теплового расширения материала сужающего устройства.

При определении расхода влажного газа в соответствии с основным уравнением расхода, объемный расход сухой его части при тех же рабочих условиях определяется по формуле:

$$Q_{CG} = Q_{BG} \left(1 - \varphi \cdot \frac{P_{BП\max}}{P} \right), \quad (3.17)$$

где Q_{CG} – объемный расход сухой части влажного газа;

Q_{BG} – объемный расход влажного газа;

$P_{BП\max}$ - максимальное давление паров воды в рабочих условиях, кгс/см²;

φ – влагосодержание газа в долях единицы;

P – абсолютное рабочее давление газа, кгс/см².

Принимая во внимание выражение (3.15), расход сухой части влажного газа может быть приведен из рабочего в нормальное состояние по формуле:

$$Q_H = 283,73 \cdot Q_{BG} \left(\frac{P}{T \cdot z} - \varphi \cdot \frac{P_{BП\max}}{T \cdot z} \right) \quad (3.18)$$

Для определения объемного расхода сухой части влажного газа, приведенного к нормальным условиям, по перепаду давления необходимо использовать следующее уравнение:

$$Q_H = 3,553 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot K_t^2 \cdot d_{20}^2 \cdot \frac{P - \varphi P_{BП\max}}{T \cdot z} \sqrt{\frac{\Delta P T z}{283,73 \rho_H (P - \varphi P_{BП\max}) + \varphi \cdot T z \rho_{BП\max}}}, \quad (3.19)$$

здесь единицы измерения параметров, входящие в уравнение, такие же, как в уравнениях (3.16) и (3.17).

Если известна плотность влажного газа в рабочих условиях, то выражение (3.19) может быть упрощено:

$$Q_H = 3,553 \alpha \varepsilon \cdot K_t^2 \cdot d_{20}^2 \cdot \frac{P - \varphi \cdot P_{BП\max}}{T \cdot z} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_{BG}}} \text{ (нм}^3/\text{час)} \quad (3.20)$$

Для определения объемного расхода жидких сред с помощью сужающих устройств с учетом уравнения (3.12) и при $\varepsilon = 1$ пользуются следующим выражением:

$$Q_o = 0,01252 \cdot \alpha \cdot K_t^2 \cdot d_{20}^2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (3.21)$$

Значения параметров, входящих в данное уравнение, такие же, как и в уравнении (3.16). Однако, для применения этого уравнения необходимо соблюдение условия бескавитационного течения несжимаемой жидкости через сужающее устройство.

Условием бескавитационного течения жидкости является выполнение соотношения $P_2/P_1 \geq CL$, где P_1 и P_2 – абсолютные давления до и после сужающего устройства в местах его отбора, а CL – оценочный критерий, рассчитываемый по формуле:

$$CL = \left[1 + \frac{a}{b} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{b}{a \cdot f_o}} \right) \right]^{-1} + \frac{P_{HП}}{P_i}, \quad (3.22)$$

где $a = 1 + \mu_1 m$; $b = 2 - f_o \cdot (7 + a)$;

f_0 – относительная растворимость газа в жидкости;

μ_1 – коэффициент сужения струи;

m – модуль сужающего устройства.

Относительная растворимость газов в жидких средах может быть рассчитана по следующей формуле:

$$f_0 = \chi \frac{m_{\Gamma}}{m_{\text{ж}}} \cdot \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{н.}\Gamma}} \cdot P_{\text{н}} \cdot \frac{T}{T_{\text{н}}}, \quad (3.23)$$

где $\chi = 1/P_0$ – коэффициент Генри;

T – рабочая температура жидкости с растворенными газами;

$T_{\text{н}}, P_{\text{н}}$ – абсолютные значения нормальной температуры и давления;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность измеряемой жидкости при рабочей температуре T ;

$\rho_{\text{н.}\Gamma}$ – плотность растворенного газа при нормальных условиях;

$m_{\Gamma}, m_{\text{ж}}$ – молекулярные массы газа и жидкости, соответственно;

P_0 – давление паров растворенного газа, в сжиженном состоянии при рабочей температуре (если бы это состояние было возможным).

Значения величины f_0 для воды в зависимости от ее температуры приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. - Относительная растворимость газов в воде

$t, ^\circ\text{C}$	$f_0 \times 10^3$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	28,8	28,3	27,8	27,3	26,7	26,2	25,7	25,1	24,6	24,0
10	23,5	23,2	22,9	22,5	22,2	21,9	21,5	21,2	20,8	20,5
20	20,1	19,9	19,7	1,4	19,2	19,0	18,8	18,5	18,3	18,1
30	17,8	17,7	17,5	17,3	17,2	17,1	17,0	16,9	16,6	16,4
40	16,3	16,2	16,1	16,0	15,9	15,8	15,7	15,6	15,6	15,5
50	15,4	15,3	15,3	15,2	15,2	15,1	15,0	14,9	14,9	14,9
60	14,8	14,8	14,8	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,6	14,6
70	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6
80	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
90	14,7	14,8	14,8	14,9	14,9	15,0	15,0	15,0	15,1	15,1

В случае измерения расхода жидких несжимаемых сред при помощи стандартных сопел, а также сопел и труб Вентури, коэффициент сужения

струи $\mu_1 = 1$, для диафрагм же значения μ_1 могут быть определены по графику, приведенному на рис. 3.2, либо по приведенной ниже эмпирической зависимости:

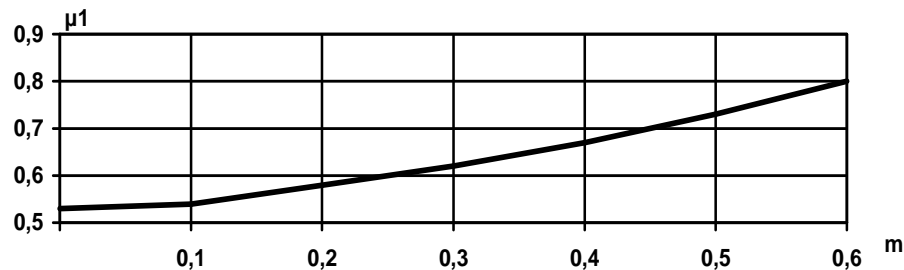


Рис. 3.2 - Зависимость коэффициента сужения струи для диафрагм

$$\mu_1 = 1,262m^3 - 1,328m^2 + 0,97m + 0,417, \quad (3.24)$$

при этом ошибка интерполяции данных не превышает 0,6%.

3.3. Основные требования к сужающим устройствам

При определении расхода различных сред при их коммерческом учете с помощью сужающих устройств по уравнениям (1.16) и (1.19-1.21), в соответствии с нормативным документом РД 50-213-80, выдвигаются определенные требования к условиям измерения, а также к диаметрам сужающих устройств и трубопроводов.

Условия измерения:

- характер движения потока измеряемой среды на прямых участках трубопроводов до и после сужающего устройства должен быть турбулентным и стационарным со скоростью не более критической;
- при прохождении потока вещества через сужающее устройство фазовое его состояние не должно меняться;
- течение жидкости должно быть бескавитационным;
- на поверхности сужающего устройства не должно образовываться различных отложений, способных изменить его размеры;

- во внутренней полости трубопроводов до и после сужающего устройства не должно скапливаться загрязнений;
- давления на входе и выходе сужающего устройства должны соответствовать соотношению $P_2/P_1 \geq 0,75$ (т.е. потери давления на сужающем устройстве не должны превышать 25%);
- при измерении расхода перегретого пара необходимо пользоваться положениями, касающимися сухого газа;
- допускается определять расход влажного пара как влажного газа, если массовая доля воды в пароводяной смеси не превышает 20%, а отношение плотности пара к плотности жидкости не превышает 0,002.

При измерении расхода с помощью диафрагм может быть использован как угловой, так и фланцевый способ отбора перепада давления, а при использовании различных сопел и труб Вентури – только угловой.

Диафрагмы с угловым способом отбора перепада давления могут применяться на трубопроводах с внутренним диаметром $50 \text{ мм} \leq D \leq 1400 \text{ мм}$, при этом их модуль должен находиться в пределах $0,05 \leq m \leq 0,64$.

Диафрагмы с фланцевым способом отбора перепада давления применяются для трубопроводов с внутренним диаметром $50 \text{ мм} \leq D \leq 760 \text{ мм}$ с модулем $0,04 \leq m \leq 0,56$. В обоих случаях диаметр отверстия диафрагмы d_{20} при 20°C должен быть не менее 12,5 мм.

При измерении расхода с помощью стандартных сопел должны соблюдаться следующие соотношения для их модулей и внутренних диаметров трубопроводов:

для жидких сред - $0,05 \leq m \leq 0,64, \quad D \geq 50 \text{ мм};$

для газов - $0,05 \leq m \leq 0,64, \quad D \geq 30 \text{ мм}.$

Для сопел Вентури для указанных выше диаметров трубопроводов при измерения жидких и газообразных сред модуль должен быть $0,05 \leq m \leq 0,6$.

Наименьший диаметр отверстия для всех типов сопел d_{20} должен быть не менее 15 мм.

Трубы Вентури могут применяться при измерениях расходов для трубопроводов с диаметром $50 \text{ мм} \leq D \leq 1400 \text{ мм}$, модуль которых составляет $0,1 \leq m \leq 0,6$.

3.4. Определение коэффициента расхода сужающих устройств

Для определения параметров, входящих в уравнения расхода, при коммерческом учете энергоносителей используются эмпирические зависимости, приводимые рядом нормативных документов и рядом авторов, позволяющие при заданных исходных данных с достаточной точностью определять расходы жидких и газообразных сред при помощи сужающих устройств, сводя к минимуму поиск и обработку требуемых справочных данных.

Коэффициенты расхода сужающих устройств (α), входящие в уравнения расхода являются основной их характеристикой и функционально зависят от модуля сужающего устройства и значения числа Рейнольдса (Re), характеризующего поток измеряемой среды. При этом для обеспечения турбулентного режима течения потоков через сужающие устройства на минимальные значения чисел Рейнольдса накладываются ограничения (Re_{\min}) для различных модулей сужающих устройств. Определение коэффициентов расхода различных сужающих устройств осуществляется с помощью интерполяционных зависимостей, приведенных ниже и при соблюдении ряда ограничений.

3.4.1. Диафрагмы с угловым способом отбора перепада давления

Для диафрагм с угловым способом отбора перепада давления (см. приложение 1) в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_{\min} \leq Re \leq 10^8$, коэффициент расхода определяется по формуле:

$$\alpha_v = \frac{k_n}{\sqrt{1-m^2}} \left[0,5959 + 0,0312 \cdot m^{1,05} - 0,184 \cdot m^4 + 0,0029 \cdot m^{1,25} \cdot \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{0,75} \right], \quad (3.25)$$

где k_{π} - коэффициент, учитывающий притупление входной кромки диафрагмы*.

При этом значения Re_{\min} выбираются в зависимости от модуля диафрагмы:

при $0,05 \leq m \leq 0,2$ $Re_{\min} = 5 \cdot 10^3$;

$0,2 < m \leq 0,59$ $Re_{\min} = 10^4$;

$0,59 < m \leq 0,64$ $Re_{\min} = 2 \cdot 10^4$.

Выражение (3.25) справедливо при выполнении следующих условий относительной шероховатости внутренней поверхности трубопроводов, по которым течет измеряемая среда:

$$\frac{k}{D} \cdot 10^4 \leq \begin{cases} 25 & \text{при } m \leq 0,09; \\ 2375 \cdot m - 1875,5 \cdot \sqrt{m} + 356,5 & \text{при } 0,09 < m \leq 0,13; \\ 3,9 + \exp(-14,2 \cdot \sqrt{m}) \cdot 10^3 & \text{при } m > 0,13, \end{cases} \quad (3.26)$$

где k – среднее значение неровностей, внутренней поверхности трубопровода, зависящее от ее состояния,* мм;

D – внутренний диаметр трубопровода, мм;

m – модуль диафрагмы.

В случае не соблюдения условий по относительной шероховатости трубопроводов, определяемых в соответствии с (3.26), в коэффициент расхода сужающего устройства необходимо ввести поправочный коэффициент на шероховатость, определяемый по формуле:

$$k_{ш} = a \cdot m + b, \quad (3.27)$$

где $k_{ш}$ – коэффициент шероховатости;

m – модуль диафрагмы;

a, b – параметры уравнения;

Определение параметров уравнения (3.27) осуществляется по нижеследующим зависимостям:

* Для новых диафрагм $k_{\pi} = 1$. На практике острота входной кромки диафрагмы определяется визуально по отражению светового луча.

* Значения k могут быть определены по данным, приведенным в приложении 2.

$$a = \begin{cases} (c - 0,3) \cdot [-1,066 \cdot c^2 + 0,36 \cdot c - 0,13], & \text{при } c \leq 0,3; \\ 0, & \text{при } c > 0,3; \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} 1 + (c - 0,3) \cdot [-0,08 \cdot c^2 + 0,024 \cdot c - 0,0046], & \text{при } c \leq 0,3; \\ 1, & \text{при } c > 0,3; \end{cases}$$

$$c = D/10^3.$$

Значения коэффициента k_n , учитывающего притупление входной кромки диафрагмы, входящего в выражение (3.25), могут быть также определены по эмпирической формуле:

$$k_n = a + b \cdot \exp[-n \cdot (m - 0,05)], \quad (3.28)$$

где $a = 1 + 0,011 \cdot \exp[-55,2 \cdot (c - 0,05)^{1,3}]$;

$$b = 0,002 + 0,0258 \cdot c - 1,68 \cdot c^2 + 2,867 \cdot c^3;$$

$$n = 4,025 + 142,94 \cdot (c - 0,05)^{1,92};$$

$$c = D/10^3.$$

3.4.2. Диафрагмы с фланцевым способом отбора перепада давления

Для диафрагм с фланцевым способом отбора перепада давления (см. приложение 1) с той же верхней границей диапазона чисел Рейнольдса, что и для диафрагм с угловым способом отбора перепада давления, а также соответствующими модулями, коэффициент расхода α_ϕ определяется по формуле:

$$\alpha_\phi = \left[\alpha_y + \frac{k_n}{\sqrt{1 - m^2}} \left(\frac{0,09 \cdot l_1 \cdot m^2}{1 - m^2} - 0,0337 \cdot l_2 \cdot m^{1,5} \right) \right] \cdot k_{ш}, \quad (3.29)$$

где α_y – коэффициент расхода, определяемый по формуле (3.25);

$k_{ш}$, k_n – поправочные коэффициенты, определяемые по выражениям (3.27) и (3.28), соответственно;

l_1 , l_2 – постоянные параметры диафрагм с фланцевым способом отбора перепада давления.

Значения постоянных l_1 и l_2 определяются в зависимости от внутреннего диаметра трубопровода следующим образом: $l_1 = l_2 = 25,4/D$ при $D > 58,6$ мм, в противном случае $l_1 = 0,433$.

Относительная шероховатость трубопроводов для диафрагм с фланцевым способом отбора перепада давления должна удовлетворять требованиям, указанным в выражении (3.26) за исключением случая, когда используются диафрагмы с большими модулями ($m > 0,13$). В этом случае должно соблюдаться соотношение $\frac{k}{D} \cdot 10^4 \leq 10$.

Минимальное же значение чисел Рейнольдса при измерении потоков с помощью диафрагм данного типа составляет: $Re_{\min} = 1260 \cdot m \cdot D$, где m - модуль диафрагмы, а D - внутренний диаметр трубопровода.

3.4.3. Стандартные сопла и сопла Вентури

Для коммерческого учета энергоносителей в качестве сужающих устройств могут быть использованы различные стандартные сопла, а также сопла Вентури (см. приложение 1). При их применении в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_{\min} \leq Re \leq 2 \cdot 10^6$, коэффициент расхода последних должен определяться по выражению:

$$\alpha_c = \frac{k_{\text{ш}}}{\sqrt{1 - m^2}} \left[0,99 + 0,2262m^{2,05} - 0,184m^4 + (215 - 1125m^{0,5} + 2490m^{2,35}) \cdot 10^{-6} \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{1,15} \right] \quad (3.30)$$

При этом выбирают следующие значения Re_{\min} в зависимости от модуля сопла:

$$\begin{aligned} \text{при } 0,05 \leq m < 0,2 & \quad Re_{\min} = 2 \cdot 10^4; \\ \text{при } 0,2 \leq m < 0,6 & \quad Re_{\min} = 7 \cdot 10^4. \end{aligned}$$

Если относительная шероховатость трубопроводов, в которых установлены в качестве сужающих устройств сопла, удовлетворяет условиям, приведенным в (3.26), то поправочный коэффициент $k_{\text{ш}}$, входящий в выражение (3.30) принимается равным единице, в противном случае этот коэффициент определяется по следующим соотношениям:

$$k_{\text{ш}} = \begin{cases} (1,002 - 0,0318 \cdot m + 0,0907 \cdot m^2) - (0,0062 - 0,1017 \cdot m + 0,2972 \cdot m^2) \cdot D \cdot 10^{-3} & \text{при } m \geq 0,27; \\ 1, & \text{при } m < 0,27 \text{ или } D > 300 \text{ мм} \end{cases} \quad (3.31)$$

3.4.4. Трубы Вентури

На практике при использовании труб Вентури в качестве сужающих устройств применяются три типа труб (см. приложение 1) с модулями $0,1 \leq m$

$\leq 0,6$ для различных диапазонов чисел Рейнольдса. Тип трубы Вентури определяется условным ее проходом D_y , условным давлением P_y и материалом из которого изготовлена труба, кроме того различают короткие и длинные трубы.

Различают следующие типы труб Вентури:

- A*- стальные сваренные из листового материала, на D_y от 200 до 1400 мм, P_y до 16 кгс/см²;
- B*- литые с необработанными входными частями и литой обработанной горловиной на D_y от 100 до 800 мм, P_y до 25 кгс/см²;
- B*- литые с обработанными входным патрубком, конусом и горловиной на D_y от 50 до 250 мм, P_y до 40 кгс/см².

Трубу Вентури принято называть длинной, если наибольший диаметр выходного конуса равен диаметру трубопровода, если же он меньше диаметра трубопровода – короткой.

Коэффициент расхода труб Вентури определяется по следующей формуле:

$$\alpha_T = \frac{1}{\sqrt{1-m}} \cdot C, \quad (3.32)$$

где C – коэффициент истечения потока.

Значения коэффициентов истечения для труб Вентури различного типа приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2.- Коэффициент истечения труб Вентури различных типов

Тип трубы Вентури	Допустимый диапазон модулей	Диапазон чисел Рейнольдса (Re)	Коэффициент истечения (C)
1	2	3	4
<i>A</i>	0,15 - 0,5	100000 – 200000	0,985
	0,15 - 0,5	200000 – 2000000	0,985
	0,15 - 0,5	более 2000000	0,985
<i>B</i>	0,1 – 0,6	100000 – 150000	0,976
	0,1 – 0,6	150000 – 200000	0,982
	0,1 – 0,6	200000 – 2000000	0,984
	0,1 – 0,6	более 2000000	0,984
<i>B</i>	0,1 – 0,6	100000 – 150000	0,977
	0,1 – 0,6	150000 – 200000	0,992
	0,1 – 0,6	200000 – 2000000	0,995
	0,1 – 0,6	более 2000000	0,995

Для упрощенных расчетов коэффициента расхода для труб Вентури значение коэффициента истечения может быть принято $C \approx 0,985$.

3.5. Определение основных параметров потоков измеряемых сред

Для коммерческого учета энергоносителей недостаточно только одного точного определения количества среды, протекающей через измерители расхода, так как изменение ее физико-химических свойств оказывает существенное влияние на точность учета в целом. В связи с этим возникает необходимость определения ряда параметров измеряемых потоков для повышения точности их учета путем введения коррекции в измеренные значения расходов. Коррекция измеряемых расходов жидких, и особенно, газообразных и парообразных сред обязательно должна осуществляться при использовании измерителей объемного расхода, к которым относятся все типы сужающих устройств, а также расчета массового расхода.

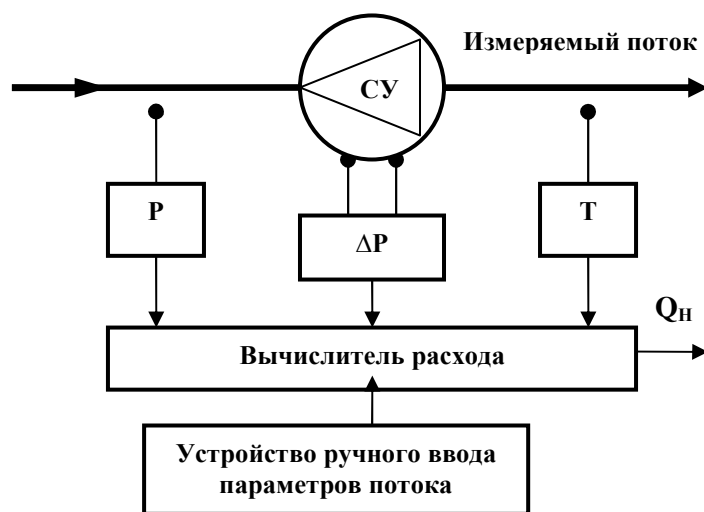


Рис. 3.2 - Структурная схема устройства измерения расхода

СУ- сужающее устройство; ΔP - преобразователь перепада давления;
Р,Т -преобразователи давления и температуры; Q_n - расчетный расход.

К основным параметрам измеряемой среды, которые необходимо определять при коммерческом учете, относятся ее состав, давление, температура, плотность, вязкость, влажность, коэффициент сжимаемости и т.д. Определение указанных параметров может быть осуществлено с помощью

соответствующих измерителей и расчетным путем. При этом, очевидно, для коммерческого учета энергоносителей необходимо использовать схемы с вычислителями расходов, в которые вводится информация автоматически либо в ручную. Тогда общая структурная схема устройства для коммерческого учета энергоносителей может быть представлена схемой, приведенной на рис.3.2.

3.5.1. Давление и температура

При определении расхода потоков сред с помощью сужающих устройств по уравнениям, приведенным выше, используются абсолютные давление и температура потоков.

Абсолютное давление измеряемой среды определяют как сумму избыточного $P_{\text{И}}$ и барометрического $P_{\text{Б}}$ давлений:

$$P_{\text{А}} = P_{\text{И}} + P_{\text{Б}} \quad (3.33)$$

Избыточное давление среды определяется с помощью манометров или дифманометров, подключаемых к трубопроводу, которые могут быть как показывающими, так и с дистанционной передачей показаний. Абсолютное или избыточное давление измеряют перед сужающим устройством (СУ) манометром любого типа на расстоянии $(5-10)D_{20}$ через отдельное отверстие, размещенное в сечении измерительного трубопровода (ИТ). Если же невозможно обеспечить требуемое расстояние, то допускается присоединение манометра к плюсовой соединительной трубке дифманометра. В этом случае место соединения трубок располагают непосредственно у СУ. При таком подсоединении манометра его одновременная работа с дифманометром не влияет на показания расходомера. При другой компоновке соединительных линий необходима проверка взаимного влияния манометра и дифманометра. Измерения абсолютного или избыточного давления выполняют с учетом разности высот установки СУ и средства измерений давления.

Избыточное давление среды обычно измеряется до сужающего устройства на расстоянии $(5-10)D_{20}$, либо отбор его осуществляется от импульсных линий положительной камеры измерителя перепада давления.

Барометрическое давление измеряют при помощи барометров, устанавливаемых в непосредственной близости от сужающих устройств.

Абсолютное давление может быть измерено непосредственно также при помощи манометров абсолютного давления. В случае, если изменение барометрического давления вызывает отклонение абсолютного давления не более 0,5%, то его можно считать постоянным.

Соотношения между единицами давления для различных систем его измерения приведены в таблице 2.3*.

Таблица 2.3 - Единицы измерения давления

единицы измерения	Числовое значение единицы измерения					
	Па	бар	атм	кгс/см ²	мм рт.ст.	мм вод.ст
Па	1,0	10 ⁻⁵	0,98692·10 ⁻⁵	1,01972·10 ⁻⁵	7,5·10 ⁻³	0,10197
бар	10 ⁵	1,0	0,98692	1,01972	750,075	10197
атм	101,048·10 ³	1,01325	1,0	1,0332	760,0	10332
кгс/см² (ат)	98,0665·10 ³	0,980665	0,96784	1,0	735,56	10000
мм рт. ст.	133,332	1,3332·10 ⁻³	1,3158·10 ⁻³	1,0	1,0	13,595
мм вод. ст	9,80665	0,98066·10 ⁻⁴	9,6784·10 ⁻⁵	1,3595·10 ⁻³ 10 ⁻⁴	7,3556·10 ⁻²	1,0

Температуру контролируемой среды определяют путем ее измерений термометрами любого типа. Абсолютная температура потока измеряемой среды находится как сумма:

$$T = t + 273,15 \quad (3.34)$$

где t – температура потока, °С.

Измерение температуры среды производят на прямых участках трубопровода на расстоянии L_1 до или L_2 после сужающего устройства, при этом учитывается диаметр термоприемника d_T и глубина его погружения h_T :

$$L_1 \geq 5 D_{20} \text{ при } d_T \leq 0,03 D_{20};$$

$$L_1 \geq 20 D_{20} \text{ при } 0,03 D_{20} < d_T \leq 0,13 D_{20};$$

$$h_T = (0,3 - 0,5) D_{20};$$

$$L_2 = (5 - 10) D_{20}.$$

Данные ограничения на установку термоприемников необходимы для того, что бы исключить возмущения потока до сужающего устройства, а также уменьшить влияние возможного изменения температуры потока после сужающего устройства на ее измерение.

* При выполнении расчетов для коммерческого учета энергоносителей в соответствии с настоящим пособием в качестве единиц измерения давления используется кгс/см².

Схемы способов установки чувствительных элементов термопреобразователей показаны на рис. 3.3.

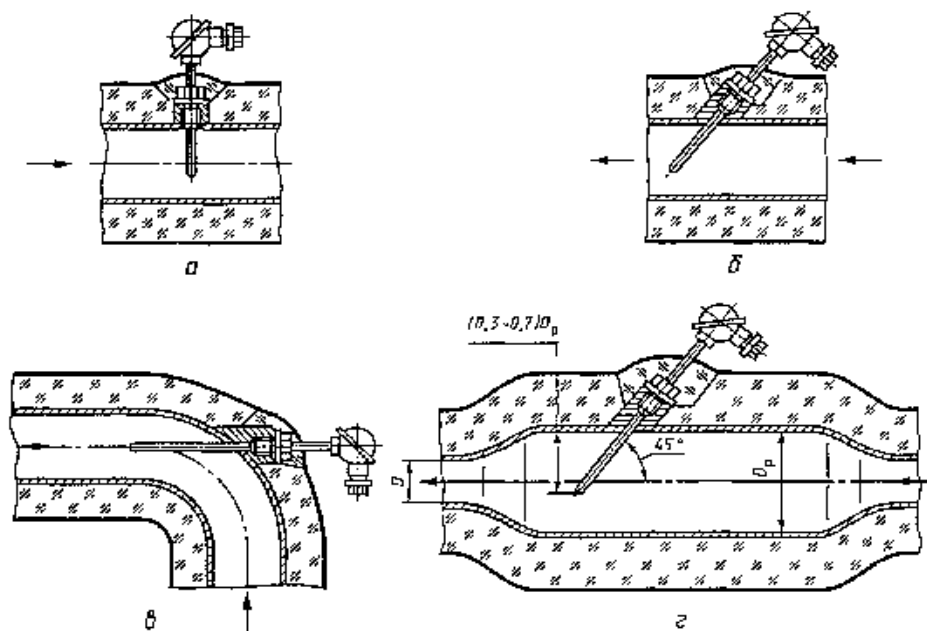


Рис. 3.3 – Способы установки термопреобразователей в трубопровод

Наилучшим способом установки чувствительного преобразователя термометра (рис. 3.3-а) является его радиальное расположение на теплоизолированном участке ИТ. Допускается также наклонная установка чувствительного преобразователя термометра или его установка за СУ в колене, как показано на рис. 2.2-б, в.

Если диаметр чувствительного преобразователя превышает $0,13D$, то при его установке за СУ необходимо применять расширитель (см. рис. 2.2-г), где D_p - диаметр расширителя.

Чувствительный элемент термометра устанавливают непосредственно в ИТ или в гильзу (карман). При установке чувствительного преобразователя термометра в кармане требуется обеспечение надежного теплового контакта. Для этого карман термометра обычно заполняется жидким маслом. Часть чувствительного элемента термометра, выступающая над ИТ, должна иметь термоизоляцию, если температура потока отличается от температуры окружающей среды более чем на $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Если контролируемая среда - газ, то при измерениях температуры потока за СУ и при достаточно большом перепаде давления вследствие расширения потока за СУ температура в точке измерения может оказаться ниже температуры перед СУ. В связи с этим для точного измерения температуры газа необходимо вводить поправку, которая, как правило, имеет значение 0,1-0,2 К.

3.5.2. Измерение плотности

Для определения плотности потока контролируемой среды применяется любой метод измерения, обеспечивающий получение достоверных данных как в рабочих условиях, так и в лабораторных. При этом для определения плотности непосредственными измерениями в рабочих условиях могут применяться сертифицированные плотномеры любого типа, не изменяющие структуру потока контролируемой среды.

Точку отбора пробы газа располагают в верхней, а жидкостей - в нижней части горизонтального участка трубопровода. Точки отбора пробы может располагаться до и после сужающего устройства на участке трубопровода, где скорость потока больше нуля и отсутствуют завихрения.

Для обеспечения неизменности структуры потока плотномер, если он находится внутри трубопровода, располагают на расстоянии от сужающего устройства не менее $8D$.

Изменение плотности контролируемой среды контролируют, путем создания потока через чувствительный элемент плотномера за счет ответвления части общего контролируемого потока. Возможные схемы установки плотномеров при непосредственном контроле плотности среды в трубопроводе приведены на рис. 3.4.

При невозможности определения плотности среды непосредственным ее измерением применяются косвенные методы с использованием необходимых для расчета измеренных параметров среды.

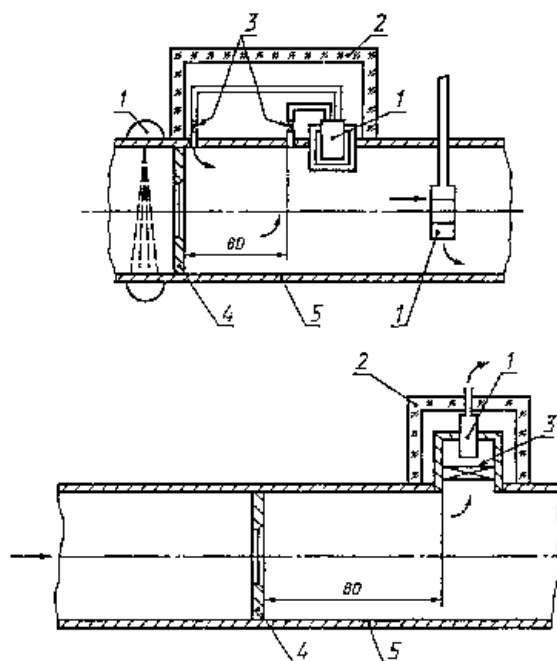


Рис. 3.4 - Схемы установки плотномеров

1 – плотномер; 2 – теплоизоляция; 3 – вентиль;
4 - сужающее устройство; 5 - трубопровод

Частота определения плотности при стандартных условиях выбирается исходя из требований к точности измерения количества среды, возможных изменений значений плотности между интервалами измерений и обусловленной этими изменениями дополнительной погрешности.

Плотность сухого газа для рабочих условий при известной его плотности в стандартных или нормальных условиях вычисляется в соответствии с выражением:

$$\rho = \rho_n \cdot \frac{P \cdot T_n}{P_n \cdot T \cdot Z} = 283,73 \cdot \frac{P \cdot T_n}{P_n \cdot T \cdot Z} \cdot \rho_n, \quad (3.35)$$

где ρ_n - плотность газа при нормальных условиях, кг/м³;

P_n, T_n - абсолютные давление и температура для нормальных условий;

Z - коэффициент сжимаемости газа.

Плотность смесей сухих газов при нормальных условиях может быть определена по известному компонентному составу смеси в соответствии со следующей формулой:

$$\rho_n = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \rho_{ni}, \quad (3.36)$$

где $N_i = \frac{m_i}{M}$ - молярная концентрация i -го компонента смеси;

m_i - число молей i -го компонента;

M - число молей смеси газа.

При известной массовой доле компонентов в газовой смеси $N_{m\ i}$ плотность при нормальных условиях определится по формуле:

$$\rho_n = \sum_{i=1}^n \frac{N_{m\ i}}{\rho_{ni}} \quad (3.37)$$

В случае измерения влажных газов* и их смесей, для которых характерно наличие в них водяного пара, плотность может быть определена, как сумма плотности сухого газа $\rho_{сг}$ и плотности водяного пара $\rho_{вп}$ при рабочих давлении и температуре:

$$\rho_{вг} = \rho_{сг} + \rho_{вп} \quad (3.38)$$

В общем случае плотность сухой части влажного газа при рабочих условиях вычисляется по выражению:

$$\rho_{сг} = \rho_n \cdot \frac{T_n \cdot (P - \varphi \cdot P_{вп\ max})}{P_n \cdot T \cdot Z}, \quad (3.39)$$

где φ - относительная влажность газа (смеси газов), в долях единицы;

$P_{вп\ max}$ - максимальное давление водяных паров при рабочей температуре, кгс/см²;

остальные обозначения такие же, как в формуле (3.35).

Плотность водяного пара в газе при рабочих условиях в общем случае и в состоянии его насыщения определяется по следующим формулам:

$$\rho_{вп} = \rho_{впн} \cdot \frac{T_n \cdot \varphi \cdot P_{вп\ max}}{P_n \cdot T \cdot Z} \quad (3.40)$$

* Газы и их смеси считаются влажными, если их относительная влажность при нормальных условиях лежит в пределах $0,1 \leq \varphi \leq 1,0$.

$$\rho_{\text{вп}}^{\text{нас}} = 0,7496 \cdot \frac{T_{\text{н}} \cdot P_{\text{вп max}}}{P_{\text{н}} \cdot T \cdot Z} \quad (3.41)$$

Влажность газа зависит от температуры и давления и выражается абсолютной или относительной влажностью.

Абсолютная влажность – количество водяного пара, определяемое его массой или объемом, содержащееся в единице объема или массы газа.

Относительная влажность – количество водяного пара во влажном газе, определяемое отношением парциального давления пара к максимальной упругости водяных паров при данной температуре. Или же, как отношение плотности водяного пара, находящегося в газе к максимально возможной его плотности при рабочих температуре и давлении, т.е.

$$\varphi = \frac{P_{\text{вп}}}{P_{\text{вп max}}} = \frac{\rho_{\text{вп}}}{\rho_{\text{вп max}}} \quad (3.42)$$

Пересчет абсолютной влажности газа f в относительную в долях единицы может быть произведен по следующим соотношениям:

при f , выраженной в кг на 1кг газа

$$\varphi = \frac{P \cdot f}{P_{\text{вп max}} \left(f + 0,7496 \cdot \frac{Z}{\rho_{\text{н}}} \right)} \quad (3.43)$$

при f , выраженной в кг на 1м³ газа

$$\varphi = \frac{f}{\rho_{\text{вп max}}} \quad (3.44)$$

При f , выраженной в м³ на 1м³ газа, используется формула (3.42).

Относительная влажность газа по известной температуре *точки росы* (T_p) определяется в соответствии с выражением:

$$\varphi = \frac{6,227 \cdot 10^{-3}}{P_{\text{вп max}}} \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot T_p}{237,3 + T_p} \right)} \quad (3.45)$$

Плотность контролируемых жидких сред должна быть определена в зависимости от рабочей температуры и давления. При этом плотность, как правило, растет с увеличением давления и убывает с ростом температуры. В

большинстве случаев плотности капельных жидкостей практически не зависят от давления и являются функцией лишь температуры.

Определение плотности жидких сред при рабочих температурах может быть проведено в соответствии с формулой:

$$\rho_{жс} = \rho_{жс}^0 \cdot [1 - \beta \cdot (t - t^0)], \quad (3.46)$$

где $\rho_{жс}^0$ - плотность жидкости при температуре t^0 ;

t - рабочая температура, ^0C ;

β^* - средний коэффициент объемного теплового расширения, $^0\text{C}^{-1}$.

3.5.3. Определение числа Рейнольдса и вязкости потоков

Число Рейнольдса (Re) является безразмерным критерием гидродинамического подобия потоков и определяет собой меру отношения сил инерции к силам вязкого трения потока. В общем случае критерий Рейнольдса прямо пропорционален скорости потока, определяющему геометрическому линейному размеру (обычно характерный диаметр D) и обратно пропорционален вязкости измеряемой среды, который определяется в соответствии с выражением:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot D}{\nu}, \quad (3.47)$$

V - скорость потока, м/с;

D - характеристический диаметр, м;

$\nu = \mu/\rho$ - кинематическая вязкость потока, $\text{м}^2/\text{с}$;

μ - динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

ρ - плотность измеряемой среды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Принимая во внимание, что при коммерческом учете энергоносителей объемный расход Q_o измеряется в $\text{м}^3/\text{ч}$, а характеристический диаметр D - в мм, то выражение (3.47) может быть представлено в следующем виде:

* значения коэффициента теплового расширения для некоторых жидкостей приведены в приложении 3.

$$Re = 0,354 \cdot \frac{Q_o}{D \cdot \nu} = 0,354 \cdot \frac{Q_o \cdot \rho}{D \cdot \mu} \quad (3.48)$$

Для расчета критерия Рейнольдса необходимо определить вязкость измеряемой среды, которая существенно зависит от рабочей температуры для жидких сред, а для газовых сред и от рабочего давления. Так для жидких сред с увеличением температуры вязкость уменьшается*, в то же время для газа она увеличивается.

Динамическая вязкость чистого газа при атмосферном давлении для различных температур может быть определена по формуле**:

$$\mu = \mu_n \cdot \frac{273,15 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1,5}, \quad (3.49)$$

где C – постоянная Сезерланда;

μ_n – вязкость газа при 0C .

Для определений динамической вязкости газовых смесей при рабочей температуре и атмосферном давлении используется следующую формулу:

$$\mu_{см} = \frac{\sum N_i \cdot \mu_i \cdot \sqrt{M_i}}{\sum N_i \cdot \sqrt{M_i}}, \quad (3.50)$$

где N_i – мольная доля i -го компонента в газовой смеси;

M_i – молекулярная масса i -го компонента;

μ_i – вязкость i -го компонента при рабочей температуре.

При коммерческом учете газовых сред в основном осуществляется учет природного газа и его смесей, поэтому в этом случае динамическую вязкость смеси природного газа можно определять с погрешностью не более 5% по следующей эмпирической зависимости:

$$\mu_{см} = 5 \cdot 10^{-7} [1 + \rho_n (1,104 - 0,25 \rho_n)] [T_{np} (1 - 0,1038 T_{np}) + 0,037] \cdot \left[1 + \frac{P_{np}^2}{30 \cdot (T_{np} - 1)} \right], \quad (3.51)$$

где T_{np} , P_{np} – приведенные температура и давление, соответственно;

* Значения коэффициента динамической вязкости для воды в зависимости от ее температуры приведены в приложении 3.

** данная формула справедлива при значении приведенного давления $P_{np} \leq 0,6$.

ρ_n – плотность газовой смеси при нормальных условиях.

Коэффициент кинематической вязкости измеряемой среды связан с коэффициентом динамической вязкости следующим соотношением:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.52)$$

3.5.4. Коэффициенты расширения и сжимаемости газа

Коэффициенты расширения и сжимаемости газа, входящие в общие уравнения расхода, учитывают свойства газовых сред в зависимости от давления и температуры.

Коэффициент расширения газа* учитывает изменение его плотности при прохождении газа через сужающее устройство и определяется в зависимости от типа сужающего устройства по следующим выражениям:

1. Для диафрагм независимо от способа отбора перепада давления

$$\varepsilon_d = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot m^2) \frac{\Delta P}{P \cdot k}; \quad (3.53)$$

2. для всех типов сопел и труб Вентури

$$\varepsilon_{CT} = \sqrt{\frac{(1 - m^2) \cdot \left(\frac{k}{1 - k}\right)}{1 - m^2 \psi^{2/k}} \cdot \psi^{2/k} \cdot \frac{1 - k^{\frac{k-1}{k}}}{\Delta P / P}}, \quad (3.54)$$

где ΔP – перепад давления на сужающем устройстве, кгс/см²;

P – рабочее давление газовой среды, кгс/см²;

$k = C_p / C_v$ – показатель адиабаты (изоэнтропии) идеального газа;

C_p, C_v – теплоемкости газа при постоянном давлении и объеме;

$$\psi = 1 - \frac{\Delta P}{P}.$$

В общем случае, показатель изоэнтропии зависит от параметров состояния – давления и температуры и может быть определен из уравнения состояния реального газа (например, уравнения Ван-дер-Ваальса) по следующему соотношению:

* коэффициент расширения для жидких сред $\varepsilon = 1$

$$k = -\frac{C_p}{C_v} \cdot \frac{v \cdot \frac{\partial T}{\partial v}}{P \cdot \frac{\partial T}{\partial P}}, \quad (3.55)$$

где v – удельный объем газа м³/кг.

Показатель адиабаты для смеси газов определяется по соотношению:

$$k = \sum_{i=1}^n N_i \cdot k_i, \quad (3.56)$$

где N_i – молярная концентрация i – го компонента;

k_i – показатель адиабаты i – го компонента.

Для смеси природных газов в диапазоне температур от -25 до +80 °С и давлений от 0 до 80 МПа показатель адиабаты определяется по эмпирическому уравнению:

$$k = 1,29 + 0,704 \cdot 10^{-6} \cdot [2575 + (346,23 - T)^2] \cdot P \quad (3.57)$$

Для определения физических свойств водяного пара можно использовать следующие эмпирические соотношения:

1. удельный объем

$$v = \frac{RT_{\Pi}}{P_{\Pi}} - \frac{A}{T_{\Pi}^{2,8}} + E(c - P_{\Pi})T_{\Pi}^{2,8} - P_{\Pi}^2 \left(\frac{B}{T_{\Pi}^{14}} + \frac{C}{T_{\Pi}^{32}} \right) - P_{\Pi}^3 \frac{D(T_{\Pi}^3 - dP_{\Pi})}{T_{\Pi}^{14}} + (eP_{\Pi} - 1)FT_{\Pi}; \quad (3.58)$$

2. динамическая вязкость

$$\mu = 8,17 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4,52 \cdot T}{T + 961} \cdot \sqrt{\frac{T}{273}} \cdot \left[1 - \frac{2,1 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 393,15)^{-2}}{v} \right], \quad (3.59)$$

где $T_{\Pi} = 647,3$ К - критическая температура водяного пара;

$P_{\Pi} = 22,56$ МПа – критическое давление водяного пара.

Коэффициенты уравнения (3.58) имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} R &= 1.3499 \times 10^{-2} & A &= 4.7331 \times 10^{-3} & B &= 2.9395 \times 10^{-3} & C &= 4.35507 \times 10^{-6} & D &= 6.70126 \times 10^{-4} \\ E &= 3.17362 \times 10^{-5} & F &= 8.06867 \times 10^{-5} & c &= 1.55108 & d &= 1.26591 & e &= 1.32735 \end{aligned}$$

Значения показателя изоэнтропии для водяного пара приведены в приложении 3.

Коэффициент сжимаемости газа учитывает отклонение свойств реальных газов от идеальных. В общем виде он может быть определен из уравнения газового состояния Клапейрона-Менделеева:

$$Z = \frac{P \cdot V}{R \cdot T}, \quad (3.60)$$

где P и T – абсолютные давление и температура газа, соответственно;

$$R = \frac{R^*}{M} - \text{постоянная газа, Дж/кг·К;}$$

$R^* = 8314,7$ Дж/кг·К – универсальная газовая постоянная;

M – молекулярная масса газа, кг/кмоль.

Для коэффициента сжимаемости всегда выполняется граничное условие:

$$\lim_{P \rightarrow 0} \frac{P \cdot v}{R \cdot T} = 1.$$

При коммерческом учете газообразных энергоносителей обязательным условием является введение в уравнение расхода коэффициента сжимаемости газа, т.к. это существенно влияет на точность определения расхода газа. Несмотря на то, что в настоящее время разработано множество методик для определения коэффициента сжимаемости газа, этот вопрос остается пока еще не полностью решенным.

Наиболее эффективно для углеводородных газов коэффициент сжимаемости может быть определен по уравнению Латонова-Гуревича:

$$Z = (0,4 \cdot \lg T_{\Pi} + 0,73)^{P_{\Pi}} + 0,1 \cdot P_{\Pi}, \quad (3.61)$$

где $T_{\Pi} = T/T_{кр}$ – приведенная температура газа;

$P_{\Pi} = P/P_{кр}$ – приведенное давления газа;

$T_{кр}$, $P_{кр}$ – критические температура и давление газа, соответственно.

При коммерческом учете газовых смесей для определения приведенных температуры и давления смеси используются псевдокритические параметры в соответствии со следующими выражениями:

$$P_{\text{пк}} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot P_{\text{кр}i}; \quad (3.62)$$

$$T_{\text{пк}} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot T_{\text{кр}i}, \quad (3.63)$$

где $T_{\text{кр}i}$, $P_{\text{кр}i}$ – критические параметры i -го компонента;

N_i – молярная концентрация i -го компонента.

Псевдокритические параметры смесей природных газов, содержащих двуокись углерода (CO_2) и азот (N_2) могут быть определены по следующим эмпирическим зависимостям:

$$P_{\text{пк}} = 30,168 \cdot [0,059 \cdot (26,83 - \rho_n) + (N_{\text{CO}_2} - 0,392 \cdot N_{\text{N}_2})]; \quad (3.64)$$

$$T_{\text{пк}} = 88,25 \cdot [1,759 \cdot (0,564 + \rho_{\text{н}}) - (N_{\text{CO}_2} + 1,681 \cdot N_{\text{N}_2})], \quad (3.65)$$

где N_{CO_2} , N_{N_2} – молярные концентрации CO_2 и N_2 , доли единицы;

$\rho_{\text{н}}$ – плотность газовой смеси при нормальных условиях, кг/м^3 .

Контрольные вопросы

1. Какие типы сужающих устройств Вам известны?
2. Перечислите стандартные сужающие устройства в порядке, соответствующему возрастанию потерь давления на них.
3. Какой метод измерения расхода энергоносителей заложен при использовании сужающих устройств?
4. Запишите общие уравнения расхода, используемые при измерениях сужающими устройствами.
5. Каким образом, зная объемный расход измеряемой среды получить ее массовый расход?
6. Как называется параметр α , входящий в уравнения расхода, и от каких физических величин он зависит?
7. Какие ограничения необходимо учитывать при определении коэффициента расхода для сужающих устройств?
8. При каком гидродинамическом режиме потока допускается измерение его расхода сужающими устройствами?
9. Каким образом определяется условие возникновения кавитации при прохождении жидкой среды через сужающее устройство?
10. Запишите формулу пересчета объемного расхода газа из рабочих условий в нормальные или стандартные условия.
11. Чем отличаются нормальные условия от стандартных?
12. Какие физико-химические параметры измеряемых сред должны учитываться при определении их коммерческого расхода?
13. Что определяет коэффициент сжимаемости газов и показатель изоэнтропии?
14. Что такое приведенные и псевдоприведенные параметры газовых сред? Каким образом они определяются.

4. РАСЧЕТ СУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ИХ УСТАНОВКА

4.1. Методика расчета сужающих устройств

Основной задачей при расчете сужающих устройств, применяемых при коммерческом учете, является определение внутреннего его диаметра при температуре 20 °С и других конструкционных характеристик в зависимости от применяемого дифференциального манометра, величины потери давления на сужающем устройстве и максимального значения величины объемного расхода измеряемой среды. Здесь необходимо иметь в виду, что при одних и тех же значениях модуля и перепада давления на сужающем устройстве при одинаковых прочих условиях сопла и трубы Вентури позволяют измерять больший расход и с большей точностью, чем диафрагма.

При выборе типа и разновидности дифманометра руководствуются следующими соображениями:

- дифманометр или другой измеритель перепада давления должен соответствовать только той измеряемой среде, для которой он предназначен (если не производится непрерывная защита его чувствительного элемента или не применяются разделительные сосуды);
- в случае использования измерителей перепада давления, потребляющих электроэнергию, на пожаро- взрывоопасных объектах необходимо обеспечить соответствующую защиту;
- давление измеряемой среды не должно превышать максимального рабочего давления, на которое рассчитан дифманометр;
- предельный перепад давления, измеряемый дифманометром, $\Delta P_{пр}$ должен быть равен или больше перепада давления, получаемого на сужающем устройстве.

Предельный перепад давления для серийно выпускаемых дифманометров определяется по стандартному ряду чисел, указанному в ГОСТ 18140-77:

$$\Delta P_{np} = (1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3) \times 10^n \text{ для } n = 0, 1, 2, 3.$$

При этом $\Delta P_{np \max} = 2500 \text{ кГс/м}^2 \text{ (мм вод ст)}$.

Предельный измеряемый объемный расход серийными дифманометрами соответствует стандартному ряду:

$$Q_{np} = (1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8) \times 10^n \text{ (при этом } Q_{mi} \leq 30\% Q_{np}).$$

Потерю давления P_{nom} для диафрагм любого типа можно определить из следующего соотношения:

$$P_{nom} = \frac{1 - \alpha \cdot m}{1 + \alpha \cdot m} \cdot \Delta P, \quad (4.1)$$

где ΔP – перепад давления на сужающем устройстве;

α – коэффициент расхода диафрагмы;

m – модуль диафрагмы.

Для определения потерь давления на соплах различного типа можно использовать график, приведенный на рис. 4.1.

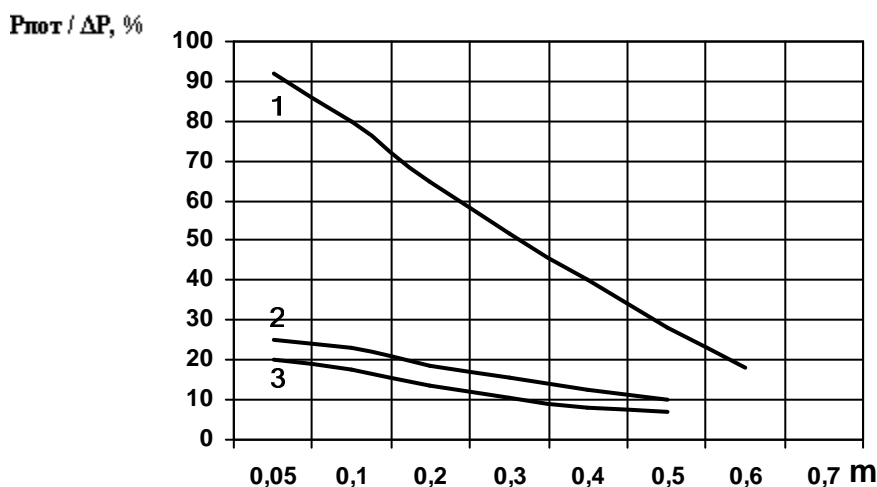


Рис. 4.1 – Зависимость потери давления модуля сужающего устройства:

1- стандартное сопло; 2- длинное сопло Вентури; 3- короткое сопло Вентури.

При расчете сужающих устройств, применяемых для определения расхода газа в нормальных условиях необходимо задаться следующими исходными данными: компонентный состав газа; максимальный расход и его плотность при нормальных условиях; давление, температура и влагосодержание газа в рабочих условиях, а также потери давления на

сужающем устройстве при максимальном расходе газа. Кроме того, необходимо задаться диаметром газопровода, его материалом и материалом сужающего устройства.

Диаметр трубопровода выбирается в соответствии с требованиями стандартов на производимые трубы, исходя из обеспечения необходимого минимального числа Рейнольдса для соответствующего модуля сужающего устройства.

После этого определяются недостающие для расчета данные, такие как абсолютные давление и температура; показатель изохэнтропии, коэффициент сжимаемости и вязкость газа при рабочих условиях; внутренний диаметр газопровода при рабочей температуре и др.

Диаметр сужающего устройства, используемого для измерения расхода газовых сред, определяется путем применения итерационной процедуры поиска, которая заключается в следующем:

1. Определяются вспомогательные величины $A_{сз}$ для сухого газа и $A_{вз}$ для влажного газа по формулам:

$$A_{сз} = \frac{Q_{н\text{ } np}}{0,2109 \cdot D^2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_n \cdot T \cdot Z}{P}}; \quad (4.2)$$

$$A_{вз} = \frac{Q_{н\text{ } np} \cdot T \cdot Z \cdot \sqrt{\rho_{вз}}}{3,553 \cdot D^2 \cdot (P - \varphi \cdot P_{вн\text{ } max})}, \quad (4.3)$$

где $Q_{н\text{ } np}$ – предельный расход, измеряемый дифманометром, приведенный к нормальным условиям;

ρ_n – плотность сухого газа при нормальных условиях;

$\rho_{вз}$ – плотность влажного газа в рабочих условиях;

φ – относительная влажность газа, в долях единицы;

D – внутренний диаметр трубопровода при рабочей температуре, мм.

2. Задается исходный модуль сужающего устройства (рекомендуемое значение исходного модуля $m_0 = 0,2$), для которого определяется число

Рейнольдса и соблюдение условий относительной шероховатости внутренней поверхности трубопровода по формуле (3.26).

3. Если соблюдаются условия по относительной шероховатости и $Re \geq Re_{min}$, то рассчитываются коэффициент расхода сужающего устройства α_1 по соответствующим формулам (3.25; 3.29; 3.30; 3.32) и коэффициент расширения газа ε_1 по формулам (3.53 или 3.54) для выбранного исходного значения модуля сужающего устройства m_0 .

4. Определяется вспомогательная величина $(m \cdot \alpha)_1$ с четырьмя значащими цифрами по выражению:

$$(m \cdot \alpha)_1 = \frac{A}{\varepsilon_1 \cdot \sqrt{\Delta P}}, \quad (4.4)$$

где A – величина, определяемая по формуле (4.2) или (4.3);

ΔP – наибольший перепад дифманометра при предельном расходе;

ε_1 – коэффициент расширения газа для предельного перепада ΔP при исходном значении m_0 .

5. Из вспомогательной величины $(m \cdot \alpha)_1$ путем ее деления на α_1 находится первое приближение модуля сужающего устройства m_1 , для которого вычисляется по известным формулам ε_2 при тех же ΔP и P .

6. Определяется разность $\Delta = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$. Если $\Delta \leq 0,0005$, то значения m_1 и ε_2 считаются окончательными. В противном же случае итерационная процедура продолжается и вычисляется вспомогательная величина $(m \cdot \alpha)_2$ при известном значении ε_2 :

$$(m \cdot \alpha)_2 = \frac{A}{\varepsilon_2 \cdot \sqrt{\Delta P}}, \quad (4.5)$$

после которой определяется значение модуля m_2 и т.д. Цикл расчета продолжается до тех пор, пока не будет выполняться условие $\varepsilon_{j+1} - \varepsilon_j \leq 0,0005$.

7. После нахождения окончательного значения модуля сужающего устройства определяется диаметр его отверстия при температуре 20 °С по формуле:

$$d_{20} = \frac{D}{K_t} \cdot \sqrt{m}, \quad (4.6)$$

где K_t – температурный коэффициент расширения сужающего устройства.

Диаметр сужающего устройства, используемого для измерения расхода жидких сред, определяется также по формуле (4.6). При этом модуль сужающего устройства рассчитывается из следующего выражения:

$$m = \frac{B}{\alpha \cdot \sqrt{\Delta P}}, \quad (4.7)$$

где α – коэффициент расхода сужающего устройства;

B – дополнительная расчетная величина;

ΔP – наибольший перепад давления на сужающем устройстве,

соответствующий Q_{\max} .

Дополнительная величина B рассчитывается в соответствии со следующими выражениями:

при определении объемного расхода

$$B = \frac{Q_{o \text{ пр}} \cdot \sqrt{\rho}}{0,01252 \cdot D^2}; \quad (4.8)$$

при определении массового расхода

$$B = \frac{Q_{m \text{ пр}}}{0,01252 \cdot D^2 \cdot \sqrt{\rho}}, \quad (4.9)$$

где ρ – плотность жидкости при рабочих условиях;

$Q_{o \text{ пр}}$, $Q_{m \text{ пр}}$ – предельные объемный и массовый расходы, измеряемые дифманометром, соответственно.

В качестве исходных данных для расчета принимают давление, температуру, плотность, вязкость измеряемой среды и внутренний диаметр трубопровода.

При расчете диафрагм необходимо также рассчитать ее минимальную толщину E , исходя из условий механической прочности диска по следующему выражению:

$$E_{\min} = 0,43 \cdot D_{20} \cdot \sqrt{\frac{1,5 \cdot \Delta P}{\sigma_B} \cdot \left[(3 + \mu_0) - (1 - \mu_0)m - 2 \cdot (1 - \mu_0) \frac{m}{1-m} \cdot \ln \frac{1}{m} \right]}, \quad (4.10)$$

где μ_0 – коэффициент Пуассона (для сталей $\mu_0 \approx 0,3$);

σ_B – предел прочности при растяжении, кг/см²;

D_{20} – внутренний диаметр трубопровода при температуре 20 °С, мм;

ΔP – наибольший перепад давления на диафрагме, кг/см²;

m – модуль сужающего устройства.

Значение диаметров сужающих устройств d и измерительного трубопровода D при рабочей температуре t определяются по следующим формулам:

$$d = d_{20} [1 + (\gamma_t (t - 20))] = d_{20} K_t; \quad (4.11)$$

$$D = D_{20} [1 + (\gamma'_t (t - 20))] = d_{20} K'_t, \quad (4.12)$$

где t – температура измеряемой среды, °С;

γ_t, γ'_t – средний коэффициент линейного теплового расширения материала сужающего устройства и трубопровода, соответственно, °С⁻¹;

K_t, K'_t – поправочные коэффициенты на изменение диаметра.

Значения температурного коэффициента линейного расширения различных материалов для широкого диапазона температур могут быть рассчитаны по следующей формуле*.

$$\gamma = 10^{-6} [a_e + 10^{-3} t b_e - 10^{-6} t^2 c_e], \quad (4.13)$$

где a_e, b_e, c_e – постоянные коэффициенты в соответствующих им диапазонах температур (см. приложение 4).

t – рабочая температура измеряемой среды, °С.

4.2. Требования к измерительному трубопроводу

Измерительный трубопровод перед сужающим устройством должен быть цилиндрическим на длине не менее $2D$. При этом трубопровод считается

* Значения коэффициентов уравнения для расчета температурного коэффициента линейного расширения различных материалов приведены в приложении 4.

цилиндрическим, если любой диаметр, измеренный не менее, чем в трех поперечных сечениях трубопровода отличается не более чем на $\pm 0,3$ % от среднего его значения.

Местные сопротивления (МС), находящиеся в измерительном трубопроводе, искажают кинематическую структуру потока. Поэтому сужающие устройства обычно устанавливаются между двумя прямыми участками трубопровода постоянного сечения необходимой длины, не содержащими МС и ответвлений. Необходимые минимальные длины прямых участков измерительных трубопроводов от вида МС, их размещения на трубопроводе, типа сужающего устройства и его модуля.

Прямые участки измерительного трубопровода должны иметь термоизоляцию. При измерении температуры перед сужающим устройством допускается термоизолировать только участок трубопровода от места размещения чувствительного элемента термометра до сужающего устройства.

При измерении температуры за сужающим устройством термоизоляции подлежат участки трубопровода до (на длине $5D$ для диафрагм и сопел, а для труб Вентури - $0,5D$) и после сужающего устройства до места размещения чувствительного элемента термометра. Измерительный трубопровод может быть не термоизолирован, если разность температур среды перед и за сужающим устройством не превышает 30% погрешности измерения температуры.

Наименьшие относительные длины L_{k1} прямых участков измерительных трубопроводов между диафрагмами, соплами и любыми ближайшими к ним МС рассчитываются по уравнению:

$$L_{k1} = \frac{L}{D} = a + b \cdot m^{0,5 \cdot c} \quad (4.14)$$

где a, b, c - коэффициенты, зависящие от типа МС, (см. табл. 4.1);

L, D - абсолютная длина и внутренний диаметр рассчитываемого участка.

Таблица 4.1. - Наименьшие относительные длины прямых участков трубопроводов.

Местное сопротивление	Коэффициенты уравнения (5.1)			Наименьшая относительная длина прямого участка при $m^{0,5}$, равном						
	a_k	b_k	c_k	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
Для МС, расположенных перед сужающим устройством										
1. Задвижка, равнопроходный шаровой кран	11,5	82,0	6,7	12	12	12	13	15	19	24
2. Пробковый кран	14,5	30,5	2,0	16	18	20	23	26	30	32
3. Запорный клапан, вентиль	17,5	64,5	4,1	18	18	19	22	26	33	38
4. Затвор (заслонка)	21,0	38,5	1,4	25	29	32	36	40	45	47
5. Конфузор	5,0	114	6,8	5	5	6	6	9	16	22
6. Симметричное резкое сужение	30,0	0,0	0,0	30	30	30	30	30	30	30
7. Диффузор	16,0	185	7,2	16	16	17	18	21	31	40
8. Симметричное резкое расширение	47,5	54,5	1,8	51	54	58	64	70	77	80
9. Одиночное колено, тройник с заглушкой	10,0	113	5,2	10	11	11	14	18	28	36
10. Группа колен в одной плоскости, разветвляющиеся потоки	13,5	82,5	3,7	14	15	17	20	26	36	42
11. Группа колен в разных плоскостях, смешивающиеся потоки	33,5	115	4,0	34	35	37	41	49	62	70
12. Местное сопротивление неопределенного типа	54,5	65,0	1,6	60	64	70	76	84	92	96
13. Гильза термометра, плотномера или карман диаметром:										
$\leq 0,03D$	5,0	0,0	0,0							5
$\leq 0,13D$	20,0	0,0	0,0	20	20	20	20	20	20	20
1.4 Струевыпрямитель	22,0	0,0	0,0	22	22	22	22	22	22	22
Для МС, расположенных за сужающим устройством										
15. Любое местное сопротивление	0,00	8,55	0,55	4	5	6	6	7	7	8

Примечания

1. Значения наименьших длин прямых участков приведены для контроля их расчета по уравнению (5.1) и округляются в большую сторону до получения целого числа.
2. Значения длин прямых участков в пунктах 1- 4 таблицы приведены для полностью открытой запорной арматуры.
3. Длины прямых участков измеряют от торцов диафрагмы до внешней границы установки МС.
4. Термометры и плотномеры диаметром менее $0,13D$ устанавливают за сужающим устройством на расстоянии $5D - 15D$.
5. Любые термометры перед сужающим устройством устанавливают не далее первого МС.

Наименьшие длины прямых участков измерительного трубопровода между трубой Вентури и МС соответствуют значениям, приведенным в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Наименьшие относительные длины трубопроводов для труб Вентури.

Местное сопротивление	Минимально допустимая длина при $\delta_L = 0,5$									
	Наименьшая длина, при которой $\delta_L = 0$									
	При $m^{0,5}$, равном									
	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
Задвижка, равнопроходный шаровой кран	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	3,5	3,5
	1,5	2,5	2,5	3,5	3,5	4,5	4,5	4,5	5,5	5,5
Конфузор	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	2,5	3,5
	0,5	1,5	2,5	4,5	5,5	6,5	8,5	9,5	10,5	11,5
Диффузор	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	2,5	3,5	4,5
	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	3,5	3,5	4,5	5,5	6,5
Одиночное колено	-	-	-	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	2,5	3,0	4,0	4,0	4,5
Группа колен в одной плоскости	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	3,5
	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	3,5	4,5	4,5	4,5
Группа колен в разных плоскостях	0,5	0,5	0,5	0,5	8,5	12,5	17,5	23,5	27,5	29,9
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Примечание - Длину прямого участка следует измерять от плоскости, проходящей через ось отверстия для отбора давления перед классической трубой Вентури.										

Для промежуточных значений относительного диаметра трубы Вентури, не указанных в табл. 5.2, наименьшие длины прямых участков измерительных трубопроводов выбирают путем линейной интерполяции табличных данных.

Для прямых участков за трубой Вентури установка деталей арматуры и других МС не отражается на точности измерений, если они расположены на расстоянии не менее $4d$ от плоскости отверстия для отбора давления за трубой Вентури.

При установке сужающих устройств за местными сопротивлениями с суммарной длиной прямых участков более $44D$ обычно применяются струевыпрямители, конструкции которых приведены на рис. 4.2. Струевыпрямители позволяют также сократить длины прямых участков трубопроводов, особенно для сужающих устройств с большой относительной площадью отверстия.

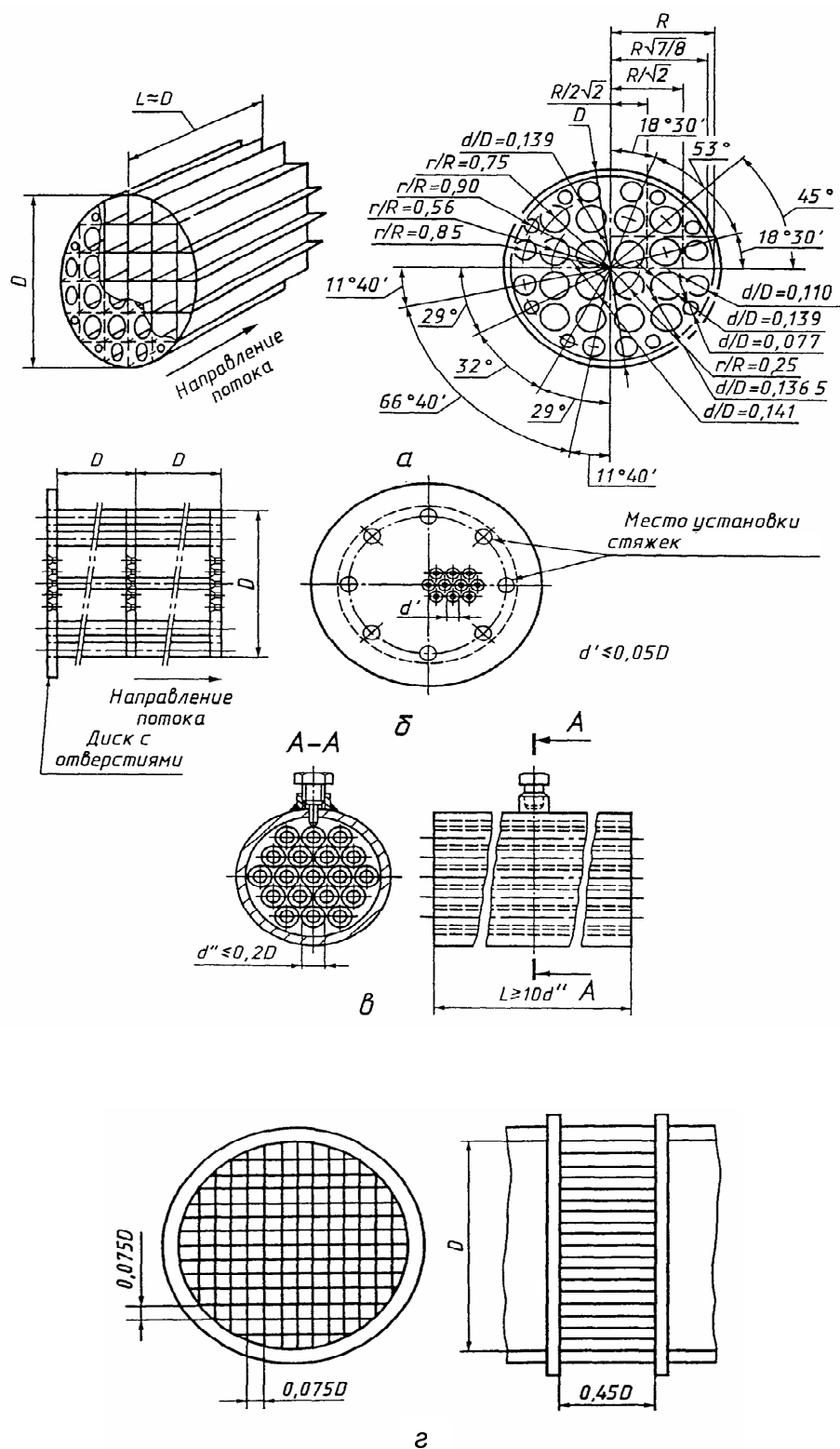


Рис. 4.2 – Конструкции применяемых струевыпрямителей

а- комбинированный с решетчатым стабилизатором и круглыми входными отверстиями;
б, в – с трубчатым стабилизатором; г- с решетчатым стабилизатором.

4.3. Схемы измерения расходов сужающими устройствами

При коммерческом учете газообразных и жидких сред с помощью сужающих устройств в качестве измерителей перепада давления на сужающем устройстве в основном применяются приборы, называемые дифференциальными манометрами или преобразователями перепада давления. Эти приборы в зависимости от наличия устройства для отсчета и дистанционной передачи показаний (электрической, пневматической и др.) подразделяются на следующие:

1. Приборы с отсчетными устройствами, находящимися в самом приборе, у которых перемещение чувствительного элемента под действием измеряемого перепада давления непосредственно используется для показания или записи;

2. Приборы с отсчетными устройствами или без них, снабженные передающими преобразователями с унифицированными выходными сигналами переменного тока и составляющие с вторичными приборами отдельные измерительные комплекты;

3. Приборы с отсчетными устройствами или без них, снабженные передающими преобразователями с унифицированными выходными сигналами постоянного тока или пневматическим сигналом, предназначенные для работы в комплекте с вторичными показывающими или регистрирующими приборами, регуляторами и информационно-вычислительными машинами.

При использовании приборов измерения перепада давления на сужающих устройствах необходимо руководствоваться следующими соображениями: видом измеряемой среды, местом установки измерителей перепада давления, способом прокладки соединительных линий, а также необходимостью применения разделительных и уравнивающих сосудов.

Далее приводятся общие методические указания по построению схем соединительных линий и их прокладке при измерении расхода жидкостей, газов и пара расходомерами с сужающим устройством, а также приводятся

различные варианты взаимного расположения сужающего устройства, вспомогательных приспособлений и дифманометров при измерений расхода указанных сред.

Длину соединительных линий выбирается такой, чтобы температура вещества, поступающего в дифманометр, была равна температуре окружающего воздуха. При этом желательно, чтобы длина линий не превышала 15 м (допускается наибольшая длина линий до 50 м.). Здесь необходимо иметь в виду, что динамическая погрешность, которую может вносить дифманометр при измерении нестационарного расхода, значительно зависит от длины и диаметра импульсных линий.

Внутренний диаметр импульсных линий должен быть не меньше 8 мм, а внутренний диаметр труб, соединяющих сужающие устройства с уравнительными или разделительными сосудами, - не менее 12 мм. При измерении расхода вещества, находящегося под низким давлением диаметр соединительных линий должен быть увеличен. Соединительные линии прокладываются по кратчайшему расстоянию вертикально или с уклоном к горизонтали не менее 1 : 10. Изгибы труб линий выполняются плавными. Соединительные линии должны быть герметичными. Кроме того, соединительные линии должны быть защищены: от воздействия внешних источников тепла или холода.

В соединительных линиях применяются только прямоточные вентили с площадью сечения проходного отверстия не менее площади сечения соединительных труб. При этом установка вентилей в трубах, соединяющих уравнительные сосуды с кольцевыми камерами или отдельными отверстиями сужающего устройства, не допускается.

При необходимости к одному сужающему устройству может быть подключено несколько дифманометров. При этом каждый дифманометр должен иметь независимые друг от друга соединительные линии, присоединяемые к отдельным отверстиям в кольцевых камерах сужающего устройства.

При измерении расхода жидких сред дифманометр подключается ниже сужающего устройства. Такой способ установки дифманометра исключает при измерении расхода возможность попадания газа, который может выделиться из протекающей жидкости в трубопроводе, в соединительные линии и прибор. При прокладке соединительных линий они должны иметь на всем протяжении уклон в одну сторону.

Для горизонтальных и наклонных трубопроводов соединительные линии подключаются к нижней части сужающего устройства под углом 30 -90°, что исключает попадание в них и измерительные приборы различного типа осадков, которые могут собираться в нижних частях сужающих устройств.

Если измеритель перепада давления будет установлен выше сужающего устройства, то в наивысших точках соединительных линий устанавливаются газосборники с вентилями для продувки. Газосборники с продувочными вентилями устанавливаются во всех случаях, когда в силу тех или иных условий прокладки соединительных линий образуются высокорасположенные отдельные участки линий, в которых могут скапливаться газы. Газосборники с вентилями для продувки устанавливаются также во всех наивысших точках соединительных линий в случаях невозможности выполнения одностороннего уклона, например, при обходе всевозможных препятствий (стен, оборудования и т. п.).

Для уменьшения возможности поступления газа из трубопровода в соединительные линии при установке дифманометра выше сужающего устройства трубки вблизи последнего прокладываются с U-образным изгибом, опускающимся ниже трубопровода не менее чем на 0,7 м.

При измерении расхода горячих жидкостей ($t > 120^{\circ}\text{C}$) необходимо обеспечивать равенство температур жидкости в обеих соединительных линиях, т.к. в противном случае не будет иметь место равенство плотностей жидкости в трубках и возникнет дополнительная погрешность. Эта погрешность будет тем больше, чем больше объем «плюсовой» камеры дифманометра. Поэтому при применении для измерения горячих жидкостей измерителей перепада

давления, которые не имеют силовую компенсацию, включаются уравнительные сосуды, обеспечивающие равенство плотностей жидкости в линиях, соединяющих сосуды с прибором. Объем внутренней полости каждого сосуда должен быть не менее объема жидкости, перетекающей из уравнительного сосуда в дифманометр при изменении его показаний от нуля до верхнего предела измерения. При этом площадь поперечного сечения уравнительного сосуда должна быть не менее площади «плюсовой» камеры дифманометра. Устройство уравнительных сосудов, а также и их расположение должны обеспечивать удаление газов (воздуха) из сосудов.

Включение уравнительных сосудов в соединительные линии производится так, чтобы для наклонных и вертикальных трубопроводов трубы, соединяющие сосуд с сужающим устройством располагались на одном уровне, соответствующем нижнему отверстию для отбора давления в сужающем устройстве. Трубу, соединяющую сосуд с верхним отверстием сужающего устройства, необходимо теплоизолировать.

При измерении расхода пара необходимо обеспечить постоянство и одинаковость верхних уровней конденсата в обеих соединительных линиях. Это достигается посредством включения в линии в непосредственной близости от сужающего устройства уравнительных сосудов. При измерении расхода в вертикальных и наклонных паропроводах боковые отверстия в уравнительных сосудах должны располагаться в плоскости верхнего отверстия для отбора давления в сужающем устройстве. Трубы, соединяющие отверстия для отбора давлений в сужающем устройстве с уравнительными сосудами, на участках вблизи сосудов должны располагаться горизонтально и на одном уровне. При этом необходимо эти трубы покрывать теплоизоляцией.

Для того, чтобы дополнительная погрешность при измерении расхода пара, которая может возникнуть из-за разности уровней конденсата в сосудах при быстром изменении расхода не оказывала влияния на измерения, уравнительные сосуды должны иметь достаточные размеры. При этом

площадь поперечного сечения в мм² уравнильного сосуда должна удовлетворять условию:

$$F \geq 0,092 \cdot (\rho_v - \rho_n) \cdot \frac{V}{\Delta P_n}, \quad (4.15)$$

где ρ_v и ρ_n - плотность воды и пара при температуре насыщения, соответствующая рабочему давлению в паропроводе, кг/м³;

V - объем «плюсовой» камеры дифманометра, мм³;

ΔP_n - предельный, номинальный перепад давления, кгс/м².

При измерении расхода пара дифманометр рекомендуется располагать ниже сужающего устройства и ниже уравнильных сосудов. Такой способ взаимного расположения сужающего устройства и дифманометра облегчает удаление воздуха из соединительных линий. Если дифманометр при измерении расхода пара располагается выше сужающего устройства, то в наивысшей точке соединительных линий следует установить, так же как и при измерении расхода воды, газосборники с вентилями для продувки. Кроме того, необходимо прокладывать соединительные линии на выходе из уравнильных сосудов с U-образным изгибом, опускающимся ниже паропровода не менее чем на 0,7 м.

При измерении расхода газа дифманометр следует устанавливать выше сужающего устройства, чтобы конденсат, образовавшийся в соединительных линиях, мог бы стекать в трубопровод. К сужающему устройству, установленному в горизонтальном или наклонном трубопроводе, соединительные линии следует присоединять к верхней его части. Это исключает возможность попадания конденсата в соединительные линии из трубопровода. Прокладку соединительных линий желательно производить вертикально, но если дифманометр устанавливается не непосредственно над сужающим устройством, то соединительные линии следует прокладывать с уклоном, достаточным для стекания конденсата в трубопровод. Если обеспечить односторонний уклон соединительных линий по всей их длине невозможно, то последние должны быть снабжены коленами и в низших

точках этих колен должны быть установлены сборники конденсата с вентилями для продувки. Кроме того, при измерении расхода горячих газов следует обеспечивать одинаковую температуру в обеих соединительных линиях. Соединительные линии не рекомендуется прокладывать вблизи горячих поверхностей печей, трубопроводов и т. д. Если этого избежать нельзя, то обе соединительные линии следует покрыть теплоизоляцией.

В случае расположения дифманометра ниже сужающего устройства рекомендуется опускать соединительные линии до точки, лежащей ниже дифманометра, где необходимо устанавливать сборники конденсата с вентилями для продувки.

Если при измерении расхода среды ее свойства или условия эксплуатации не позволяют присоединять дифманометр к сужающему устройству указанными выше способами, то в соединительные линии включают разделительные сосуды. Разделительные сосуды должны устанавливаться в соединительных линиях как можно ближе к сужающему устройству.

Уровни разделительной жидкости в сосудах должны быть одинаковыми при нулевом перепаде давления. Разделительную жидкость подбирается таким образом, чтобы она химически не реагировала с измеряемой средой, не смешивалась с ней, а также не давала отложений и не воздействовала на материал разделительных сосудов, импульсных линий и внутренней полости измерительного прибора.

Обычно в качестве разделительных жидкостей используют воду, легкие минеральные масла, глицерин, водные растворы этиленгликоля и другие жидкости. Использование разделительных жидкостей с поплавковыми, кольцевыми и колокольными дифманометрами приводит к возникновению существенной дополнительной погрешности, что накладывает определенные требования на выбор дифманометра. При измерении же расхода мембранными или сильфонными измерителями перепада давления с силовой компенсацией влиянием разделительных сосудов можно пренебречь.

Схемы подключения измерителей перепада давления и импульсных линий приведены в приложении 5.

4.4. Погрешности измерения расхода

Измерение расхода вещества по перепаду давления в сужающем устройстве относится к виду косвенных измерений. При измерении расхода жидкостей, газов и пара по перепаду давления в сужающем устройстве следует учитывать неизбежные погрешности при определении отдельных величин, входящих в уравнения расхода, т.к. общая погрешность измерения расхода складывается из погрешностей этих величин.

Для определения погрешности измерения расхода, необходимо обратить внимание на то, что уравнения расхода содержат две группы величин:

- величины, которые были найдены путем обработки большого числа измерений;
- величины, измеряемые однократно или определяемые по справочным данным.

К первой группе относятся величины α , ε и Z . Для этих величин, найденных путем обработки большого числа измерений, известны средние квадратические и предельные погрешности и их доверительные вероятности. Для погрешностей этих величин справедлив закон сложения средних погрешностей.

Ко второй группе относятся величины ΔP , T , P , d , φ и ρ , которые оцениваются основной допускаемой погрешностью, зависящей от класса точности применяемого прибора, или наибольшей погрешностью табличных данных. Такие величины, как плотность при нормальных условиях, коэффициент линейного теплового расширения металлов и т.д., определяемые по справочным табличным данным, относятся также ко второй группе, т.к. они могут быть оценены только максимальной погрешностью. Доверительная вероятность погрешностей величин, отнесенных ко второй группе, неизвестна.

Принятое деление величин на две группы не дает обоснования к применению закона сложения средних погрешностей для оценки точности измеряемых расходов при косвенном измерении в строгом его понимании.

В качестве такого обоснования приняты допущения, что основная допустимая погрешность, определяемая классом точности применяемого прибора, и максимальная погрешность величин, находимые по справочным данным, равны удвоенной средней квадратической (предельной) погрешности, для которой доверительная вероятность составляет 95%. Правилами измерения расхода с помощью сужающих устройств оценка погрешности измерения производится следующим образом.

Предельная относительная погрешность измерения расхода рассчитывается по формуле:

$$\delta_Q = 2 \cdot \sigma_Q + \delta_l, \quad (4.16)$$

где σ_Q - средняя квадратическая относительная погрешность измерения расхода, %;

δ_l - погрешность, учитывающая влияние уменьшения длины прямого участка трубопровода перед или за сужающим устройством, %.

Предельная относительная погрешность измерения расхода, отнесенная к верхнему пределу измерений дифманометра (комплекта) определяется по формуле:

$$\delta'_Q = \frac{(2 \cdot \sigma_Q + \delta_l) \cdot Q}{Q_n}, \quad (4.17)$$

где Q - измеренный расход;

Q_n – предельный расход, измеряемый дифманометром.

Средняя квадратическая относительная погрешность измерения расхода показывающим дифманометром или вторичным прибором, работающим в комплекте с ним, подсчитывается по формуле:

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta P}}^2 + 4 \cdot \sigma_d^2 + 0,25 \cdot \sigma_\rho^2}, \quad \%, \quad (4.18)$$

где $\sigma_\alpha, \sigma_\varepsilon, \sigma_{\sqrt{\Delta P}}, \sigma_d, \sigma_\rho$ - среднеквадратические погрешности определения коэффициентов расхода и расширения газа, перепада давления, диаметра отверстия сужающего устройства и плотности среды, соответственно.

При принятых допусках на диаметр цилиндрического отверстия сужающего устройства погрешностью $4\sigma_d^2$ можно пренебречь, т.к. она незначительна по сравнению с остальными слагаемыми.

Составляющие среднеквадратические погрешности расхода, входящие в уравнение (4.18), зависящие от модуля сужающего устройства, числа Рейнольдса и внутреннего диаметра измерительного трубопровода могут быть определены по графикам, приведенным на рис. 4.3 – рис. 4.7.

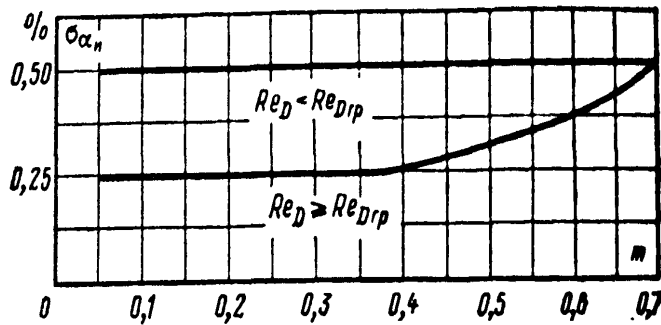


Рис. 4.3 – Среднеквадратичная погрешность исходного коэффициента расхода диафрагм

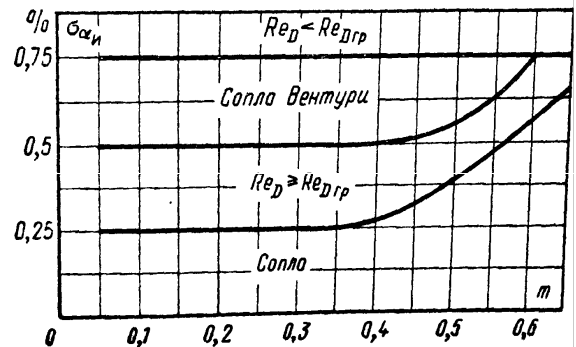


Рис. 4.4 – Среднеквадратичная погрешность исходного коэффициента расхода сопел и сопел Вентури

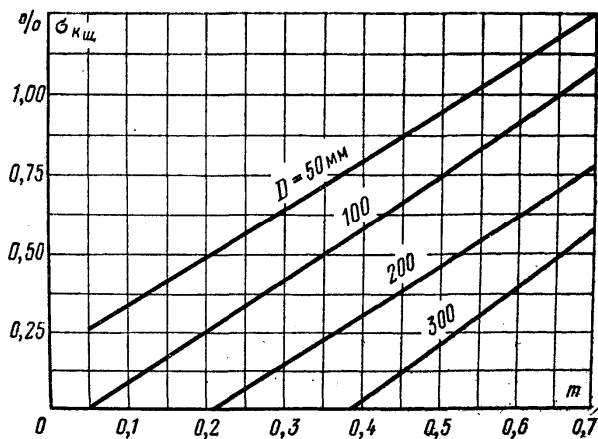


Рис. 4.5 – Среднеквадратичная погрешность поправочного множителя на шероховатость для диафрагм

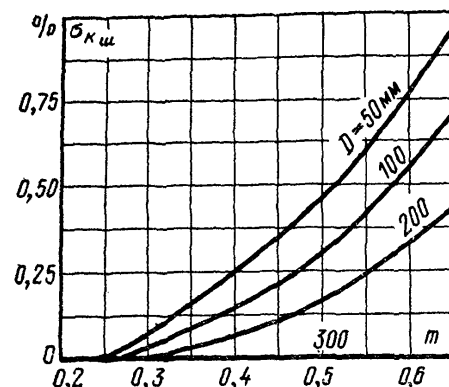


Рис. 4.6 – Среднеквадратичная погрешность поправочного множителя на шероховатость для сопел и сопел Вентури

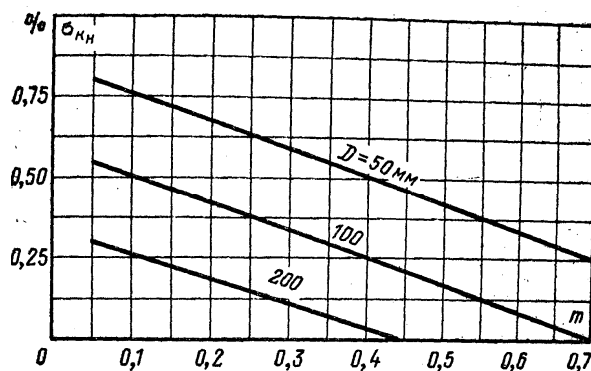


Рис. 4.7 – Среднеквадратичная погрешность поправочного множителя на неостроту входной кромки диафрагмы

Среднеквадратичная погрешность поправочного множителя на расширение измеряемой газообразной среды ε рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\varepsilon} = \sqrt{\sigma_{\varepsilon_{cp}}^2 + \sigma_{\varepsilon_1}^2} \quad (4.19)$$

Здесь значения $\sigma_{\varepsilon_{cp}}^2$ и $\sigma_{\varepsilon_1}^2$ вычисляются по формулам:

$$\sigma_{\varepsilon_{cp}} = n \cdot \frac{\Delta P_{cp}}{P_1}, \quad (4.20)$$

$$\sigma_{\varepsilon_1} = \frac{(\varepsilon_{cp} - \varepsilon)}{2 \cdot \varepsilon_1} \cdot 100\% \quad (4.21)$$

где ΔP_{cp} – средний перепад давления на сужающем устройстве;

P_1 – давление в трубопроводе перед сужающим устройством;

n – множитель, равный 1% для сопел, 2% - для диафрагм ($m \leq 0,56$), 4% - для диафрагм ($m > 0,56$).

Погрешность измерения расхода в зависимости от перепада давления на сужающем устройстве, измеряемая при помощи дифманометра, связана с классом точности измерителя и предельно измеряемым расходом. При этом средняя квадратическая погрешности измерителя может быть определена по следующей формуле:

$$\sigma_{\sqrt{\Delta P}} = \frac{\delta_Q \cdot Q_n}{2 \cdot Q}, \quad (4.22)$$

где δ_Q - основная допустимая ошибка прибора по расходу, %;

Q_n - предельное значение шкалы измерителя.

Погрешность на плотность измеряемой среды может быть подсчитана по следующим формулам:

$$\text{для жидкости} \quad \sigma_{\rho} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta \rho_{20}}{\rho_{20}}\right)^2 + \frac{(t-20)^2 \cdot \Delta \beta^2 + \beta^2 \cdot \Delta t^2}{[1 - \beta \cdot (t-20)]^2}}}{2} \cdot 100; \quad (4.23)$$

$$\text{для газа} \quad \sigma_{\rho} = \sqrt{\sigma_{\rho_n}^2 + \sigma_P^2 + \sigma_T^2 + \sigma_Z^2}, \quad (4.24)$$

где $\Delta \rho_{20}$ и $\Delta \beta$ - максимальные абсолютные погрешности табличных значений плотности и коэффициента температурного расширения среды*;

Δt – основная допустимая погрешность измерения температуры, °C;

* Погрешность табличного значения величины определяется как половина единицы разряда последней значащей цифры.

σ_{ρ_n} – погрешность определения плотности при нормальных условиях;
 σ_P – погрешность определения абсолютного давления газа;
 σ_T – погрешность определения абсолютной температуры газа;
 σ_Z – погрешность определения коэффициента сжимаемости газа.

Контрольные вопросы

1. Что является основной задачей при расчете сужающего устройства?
2. Какой сигнал, получаемый на выходе сужающего устройства, позволяет определить величину расхода измеряемой среды в трубопроводах?
3. Какие приборы применяются для измерения выходного сигнала, получаемого от сужающих устройств?
4. Каков предельный перепад давления может быть получен на серийно выпускаемых дифференциальных манометрах?
5. Перечислите основные исходные данные, необходимые для определения расхода газовых сред при помощи сужающих устройств.
6. Какие исходные данные необходимо знать при определении расхода жидких сред?
7. Каким образом рассчитываются потери давления на диафрагмах при заданном перепаде давления и известных модуле и коэффициенте расхода?
8. Какие максимальные потери давления допускаются на сужающих устройствах?
9. Опишите, по какому алгоритму производится расчет сужающих устройств при измерении расхода газообразных (жидких) сред?
10. От каких параметров зависит толщина диафрагмы?
11. В каких случаях необходимо использовать поправку на температурное расширение сужающих устройств и трубопроводов?
12. Запишите выражение для определения поправочного коэффициента на температурное расширение сужающего устройства или измерительного трубопровода.
13. Что необходимо учитывать при определении погрешности измерения расхода с помощью сужающих устройств?

5. КОММЕРЧЕСКИЙ УЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

5.1. Общие сведения

Измерение расхода и количества тепла, поставляемое потребителю, играет важную роль в системах энергосбережения и автоматизации тепловых сетей. В качестве энергоносителя в тепловых системах обычно используется горячая вода или пар. В настоящее время коммерческий учет отпускаемого или потребляемого тепла осуществляется расчетным путем по данным раздельного измерения температуры прямого и обратного теплоносителей, а также его расхода.

В общем случае расход тепла, отпускаемый потребителю в единицу времени может быть определен в соответствии с выражениями:

$$q = Q_m \cdot (i_1 - i_2) = Q_o \cdot \rho \cdot (i_1 - i_2), \quad (5.1)$$

$$q = Q_m \cdot c \cdot (t_1 - t_2) = Q_o \cdot \rho \cdot c \cdot (t_1 - t_2), \quad (5.2)$$

где Q_m и Q_o – массовый и объемный расход теплоносителя в подающей линии, соответственно, кг/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$);

i_1, i_2 – удельная энтальпия прямого и обратного теплоносителей, Дж/кг;

t_1, t_2 – температура прямого и обратного теплоносителей, $^{\circ}\text{C}$;

ρ – плотность прямого теплоносителя, $\text{кг}/\text{м}^3$;

c – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$.

По аналогии с определением расходомера и счетчика количества, прибор, измеряющий расход тепла в единицу времени называют **тепломером**. Прибор, измеряющий расход и количество тепла за определенный промежуток времени $\tau = \tau_1 - \tau_2$, называют тепломером со счетчиком количества тепла или **теплосчетчиком**. Этот прибор позволяет определить количество тепла, полученное или отпущенное за некоторый отчетный период, в соответствии с формулой:

$$q_{\Sigma} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} q d\tau. \quad (5.3)$$

Очевидно, что для реализации учета теплоносителя в соответствии с алгоритмом (5.2), применяемым на практике, тепломер должен состоять из приборов, измеряющих температуру прямого и обратного теплоносителей, а также расход прямого (или обратного) теплоносителя. Кроме того, в составе теплового измерителя необходимо использовать корректирующие, множительные устройства и интегратор. В качестве устройства для измерения расхода теплоносителя могут быть использованы любые из известных расходомеров, указанные выше, а для измерения температуры- любые термоэлектрические термометры и термометры сопротивления.

Пределы допускаемой основной погрешности для тепломеров, используемых в коммерческом учете теплоносителей, не должен превышать $\pm 2,5\%$ нормирующего значения измеряемой величины. При оценке погрешностей результата измерения количества или расхода тепла необходимо учитывать возможные методические погрешности, а также изменение показаний тепломеров, обусловленное влиянием температуры окружающего воздуха и других факторов.

5.2. Системы учета тепловой энергии

Учет и регистрация отпуска и потребления тепловой энергии организуются с целью:

- осуществления взаимных финансовых расчетов между энергоснабжающими организациями и потребителями тепловой энергии;
- контроля за тепловыми и гидравлическими режимами работы систем теплоснабжения и теплопотребления;
- контроля за рациональным использованием тепловой энергии и теплоносителя;
- документирования параметров теплоносителя: массы (объема), температуры и давления.

Расчеты потребителей тепловой энергии с энергоснабжающими организациями за полученное ими тепло осуществляются на основании показаний приборов учета и контроля параметров теплоносителя, установленных у потребителя и допущенных в эксплуатацию в качестве коммерческих.

В случаях, когда к магистрали, отходящей от источника теплоты, подключен один единственный потребитель (магистраль находится на балансе потребителя) допускается ведение учета потребляемой тепловой энергии по приборам на узле учета источника теплоты.

5.2.1. Учет тепловой энергии и теплоносителя в источнике теплоты

Источниками тепловой энергии являются теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), районные тепловые станции (РТС), котельные и т.д. В настоящее время все источники тепловой энергии снабжаются узлами учета отпускаемого тепла. Обычно Узлы учета тепловой энергии оборудуются у границы раздела балансовой принадлежности трубопроводов в местах, максимально приближенных к головным задвижкам источника.

На каждом узле учета тепловой энергии источника теплоты с помощью приборов определяются следующие параметры:

- время работы приборов узла учета;
- отпущенная тепловая энергия;
- масса (объем) теплоносителя, отпущенного и полученного источником теплоты соответственно по подающему и обратному трубопроводам;
- масса (объем) теплоносителя, расходуемого на подпитку системы теплоснабжения;
- тепловая энергия, отпущенная за каждый час;
- масса (объем) теплоносителя, отпущенного источником теплоты по подающему трубопроводу и полученного по обратному трубопроводу за каждый час;

- масса (объем) теплоносителя, расходуемого на подпитку систем теплоснабжения за каждый час;
- среднечасовая и среднесуточная температура теплоносителя в подающем, обратном трубопроводах и трубопроводе холодной воды, используемой для подпитки;
- среднечасовое давление теплоносителя в подающем, обратном трубопроводах и трубопроводе холодной воды, используемой для подпитки.

Среднечасовые и среднесуточные значения параметров теплоносителя определяются на основании показаний приборов, регистрирующих параметры теплоносителя. При этом приборы учета, устанавливаемые на обратных трубопроводах магистралей, размещаются до места присоединения подпиточного трубопровода.

На рис. 5.1 приведена общая принципиальная схема организации учета водяного теплоносителя в источнике.

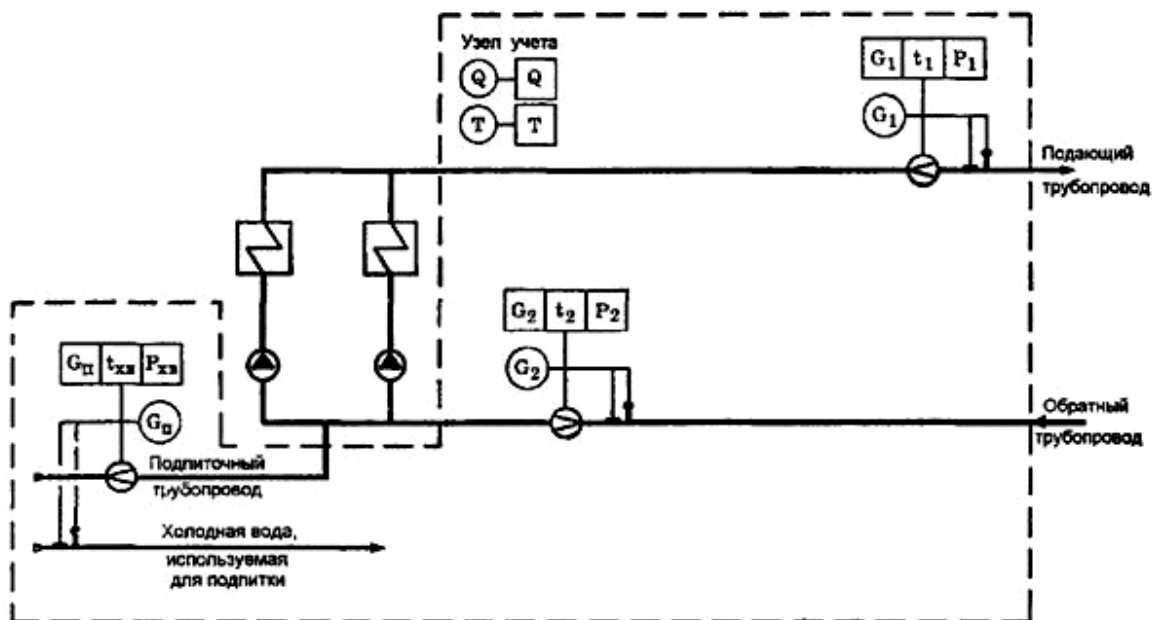


Рис. 5.1 - Принципиальная схема размещения точек измерения массы (объема) теплоносителя и его регистрируемых параметров на источнике теплоты для водяных систем теплоснабжения

При такой схеме организации учета количество тепловой энергии, отпущенной источником теплоты, определяется как сумма количеств тепловой энергии, отпущенной по его выводам.

Количество же тепловой энергии по каждому отдельному выводу, определяется как алгебраическая сумма произведений массы теплоносителя по каждому трубопроводу (подающему, обратному и подпиточному) на соответствующую энтальпию. Масса сетевой воды в обратном и подпиточном трубопроводах берется с отрицательным знаком.

Для определения количества тепловой энергии Q , отпущенной источником теплоты, используется формула:

$$Q = \left(\sum_{i=1}^a G_{1i} \cdot h_{1i} - \sum_{j=1}^b G_{2j} \cdot h_{2j} - \sum_{k=1}^m G_{пв\ k} \cdot h_{пв\ k} \right), \quad (5.4)$$

где a - количество узлов учета на подающих трубопроводах;

b - количество узлов учета на обратных трубопроводах;

m - количество узлов учета на подпиточных трубопроводах;

G_{1i} – масса теплоносителя, отпущенного источником теплоты по каждому подающему трубопроводу;

G_{2j} - масса теплоносителя, возвращенного источнику теплоты по каждому обратному трубопроводу;

$G_{пв\ k}$ - масса теплоносителя, израсходованного на подпитку каждой системы теплоснабжения потребителей тепловой энергии;

h_{1i} - энтальпия сетевой воды в соответствующем подающем трубопроводе;

h_{2i} - энтальпия сетевой воды в соответствующем обратном трубопроводе;

$h_{хв\ k}$ - энтальпия холодной воды, используемой для подпитки соответствующей системы теплоснабжения потребителей тепловой энергии.

Средние значения энтальпий за соответствующий интервал времени определяются на основании измерений среднечасовых температур и давлений.

Организации учета водяного теплоносителя в источнике осуществляется по схеме, приведенной на рис. 5.2.

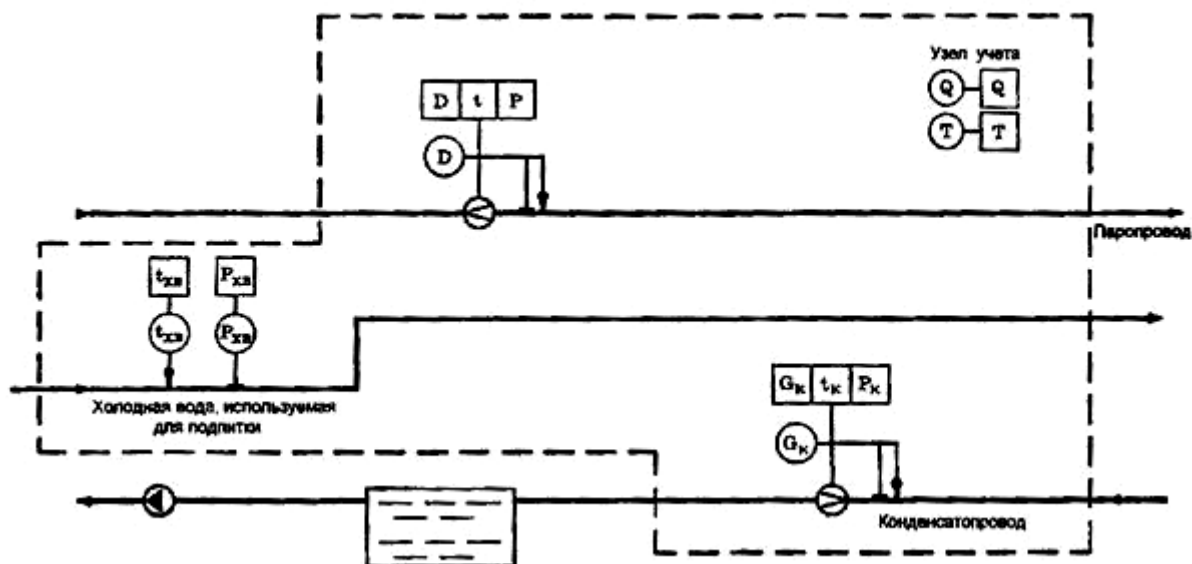


Рис. 5.2 - Принципиальная схема размещения точек измерения массы (объема) теплоносителя и его регистрируемых параметров на источнике теплоты для паровых систем теплоснабжения

На каждом узле учета тепловой энергии источника теплоты с помощью приборов должны определяться:

- время работы приборов узла учета;
- отпущенная тепловая энергия;
- масса (объем) отпущенного пара и возвращенного источнику теплоты конденсата;
- тепловая энергия, отпущенная за каждый час;
- масса (объем) отпущенного пара и возвращенного источнику теплоты конденсата за каждый час;
- среднечасовые значения температуры пара, конденсата и холодной воды, используемой для подпитки;
- среднечасовые значения давления пара, конденсата и холодной воды, используемой для подпитки (среднечасовые значения параметров теплоносителя, а также их средние величины за какой-либо другой промежуток времени определяются на основании показаний приборов, регистрирующих параметры теплоносителя).

Для определения количества тепловой энергии пара Q , отпущенной источником теплоты, используется формула:

$$Q = \left(\sum_{i=1}^k D_i \cdot (h_i - h_{x6}) - \sum_{j=1}^m G_{kj} \cdot (h_{kj} - h_{x6}) \right) \cdot 10^{-3}, \quad (5.5)$$

где k - количество узлов учета на паропроводах;

m - количество узлов учета на конденсатопроводах;

D_i - масса пара, отпущенного источником теплоты по каждому паропроводу;

G_{kj} - масса конденсата, полученного источником по каждому конденсатопроводу;

h_i - энтальпия пара в соответствующем паропроводе;

h_{kj} - энтальпия конденсата в соответствующем конденсатопроводе;

h_{x6} - энтальпия холодной воды, используемой для подпитки.

5.2.2. Учет тепловой энергии теплоносителя у потребителя теплоты

У потребителей тепловой энергии различают две схемы водяного теплоснабжения – закрытую и открытую, в соответствии с которыми организуется определенный вид коммерческого учета тепла, зависящий также от тепловой мощности потребителя.

В открытых и закрытых системах теплоснабжения на узле учета тепловой энергии и теплоносителя с помощью приборов определяются:

- время работы приборов узла учета;
- полученная тепловая энергия;
- масса (объем) теплоносителя, полученного по подающему трубопроводу и возвращенного по обратному трубопроводу;
- масса (объем) теплоносителя, полученного по подающему трубопроводу и возвращенного по обратному трубопроводу за каждый час;
- среднечасовая и среднесуточная температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах узла учета.

В системах теплоснабжения, подключенных по независимой схеме, дополнительно должна определяться масса (объем) теплоносителя, расходуемого на подпитку.

В открытых системах теплоснабжения дополнительно определяться:

- масса (объем) теплоносителя, израсходованного на водоразбор в системах горячего водоснабжения;
- среднечасовое давление теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах узла учета.

Среднечасовые и среднесуточные значения параметров теплоносителя определяются на основании показаний приборов, регистрирующих параметры теплоносителя.

Принципиальная схема размещения точек измерения массы (объема) теплоносителя, его температуры и давления, состав измеряемых и регистрируемых параметров теплоносителя в открытых системах теплоснабжения приведены на рис. 5.3, а в закрытых системах теплоснабжения - на рис. 5.4.

В открытых и закрытых системах теплоснабжения, где суммарная тепловая нагрузка не превышает 0,5 Гкал/ч, масса (объем) полученного и возвращенного теплоносителя за каждый час и среднечасовые значения параметров теплоносителей могут не определяться.

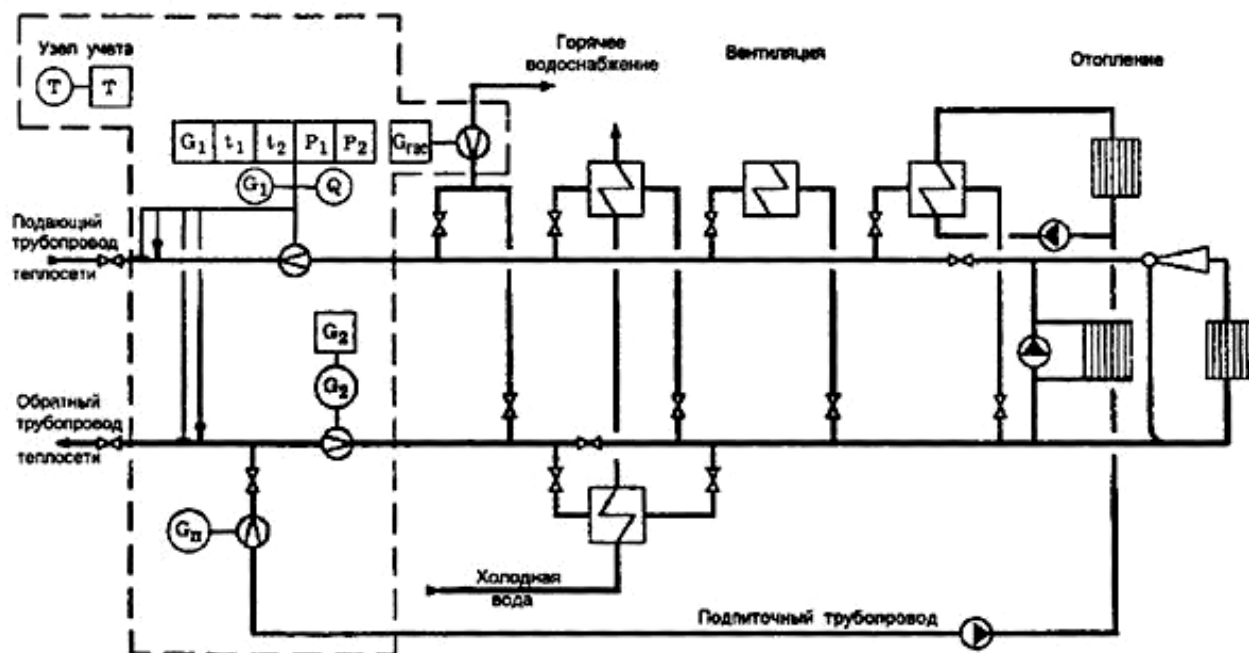


Рис. 5.3 - Принципиальная схема измерения количества тепловой энергии и массы (объема) теплоносителя, а также его регистрируемых параметров в открытых системах теплоснабжения

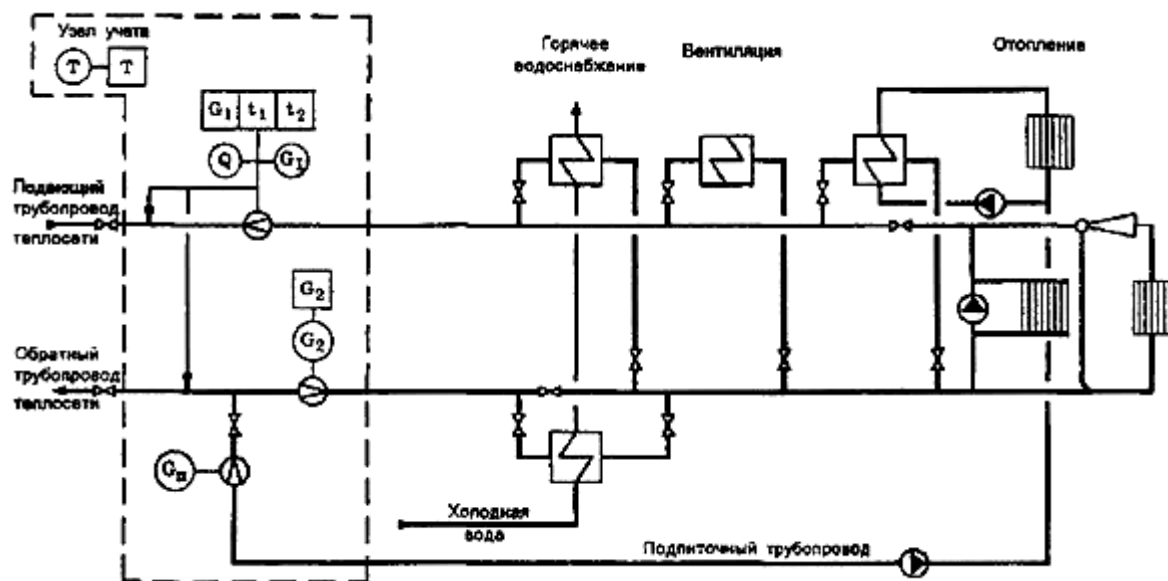


Рис.5 4 - Принципиальная схема измерения количества тепловой энергии и массы (объема) теплоносителя, а также его регистрируемых параметров в закрытых системах теплоснабжения

У потребителей в открытых и закрытых системах теплоснабжения, суммарная тепловая нагрузка которых не превышает 0,1 Гкал/ч, на узле учета с помощью приборов можно определять только время работы приборов узла учета, массу (объем) полученного и возвращенного теплоносителя, а также массу (объем) теплоносителя, расходуемого на подпитку.

В открытых системах теплоснабжения дополнительно определяется масса теплоносителя, поступившего на водоразбор в системе горячего водоснабжения.

Узел учета тепловой энергии и параметров теплоносителя оборудуется на тепловом пункте, принадлежащем потребителю, в месте, максимально приближенном к его головным задвижкам.

Количество тепловой энергии, получаемой потребителем, определяются на основании показаний приборов учета за определенный период в соответствии с формулой:

$$Q = Q_{\text{и}} + Q_{\text{п}} + (G_{\text{п}} + G_{\text{гв}} + G_{\text{в}})(h_1 - h_2) 10^{-3}, \quad (5.6)$$

где $Q_{\text{и}}$ - тепловая энергия, израсходованная потребителем, по показаниям теплосчетчика;

$Q_{\text{п}}$ - тепловые потери на участке от границы балансовой принадлежности системы теплоснабжения потребителя до его узла учета (учитывается, если узел учета оборудован не на границе балансовой принадлежности);

$G_{\text{п}}$ - масса сетевой воды, израсходованной потребителем на подпитку систем отопления, определенная по показаниям водосчетчика (учитывается для систем, подключенных к тепловым сетям по независимой схеме);

$G_{\text{гв}}$ - масса сетевой воды, израсходованной потребителем на водоразбор, определенная по показаниям водосчетчика (учитывается для открытых систем теплоснабжения);

$G_{\text{у}}$ - масса утечки сетевой воды в системах теплоснабжения;

h_2 - энтальпия сетевой воды на выходе обратного трубопровода источника теплоты;

$h_{\text{хв}}$ - энтальпия холодной воды, используемой для подпитки систем теплоснабжения на источнике теплоты.

Величины h_2 и $h_{\text{хв}}$ определяются по измеренным на узле учета источника теплоты средним за рассматриваемый период значениям температур и давлений.

Величина утечки сетевой воды определяется по показаниям водосчетчиков в соответствии с формулой:

$$G_{\text{у}} = [G_1 - (G_2 + G_{\text{гв}})], \quad (5.7)$$

где G_1 – масса сетевой воды в подающем трубопроводе;

G_2 – масса сетевой воды в обратном трубопроводе;

$G_{\text{гв}}$ - масса сетевой воды в трубопроводе горячего водоснабжения.

В паровых системах теплоснабжения в узле учета тепловой энергии и теплоносителя с помощью приборов определяются:

– время работы приборов узла учета;

- полученная тепловая энергия;
- масса (объем) полученного пара;
- масса (объем) возвращенного конденсата;
- масса (объем) получаемого пара за каждый час;
- среднечасовые значения температуры и давления пара;
- среднечасовая температура возвращаемого конденсата.

Среднечасовые значения параметров теплоносителя определяются на основании показаний приборов, регистрирующих эти параметры.

В системах теплоснабжения, подключенных к тепловым сетям по независимой схеме, должна определяться масса (объем) конденсата, расходуемого на подпитку.

Принципиальная схема размещения точек измерения массы (объема) теплоносителя, его температуры и давления, состав измеряемых и регистрируемых параметров теплоносителя в паровых системах теплоснабжения приведены на рис. 5.5.

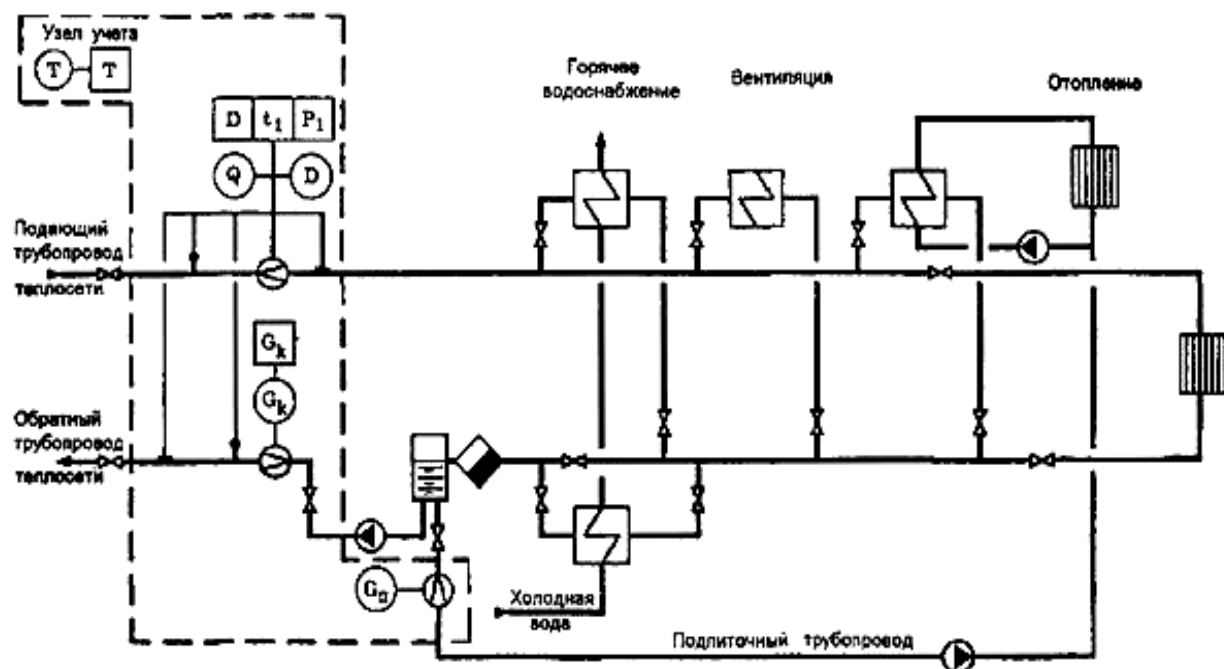


Рис. 5.5. Принципиальная схема измерения количества тепловой энергии и количества теплоносителя, а также его регистрируемых параметров в паровых системах теплоснабжения

Количество тепловой энергии, полученных паровыми системами теплопотребления и количество теплоносителя определяются по формуле:

$$Q = Q_{\text{и}} + Q_{\text{п}} + (D - G_{\text{к}}) (h_{\text{к}} - h_{\text{хв}}) \cdot 10^{-3}, \quad (5.8)$$

где $Q_{\text{и}}$ - тепловая энергия, израсходованная потребителем по показаниям теплосчетчика;

$Q_{\text{п}}$ - тепловые потери;

D - масса пара, полученная потребителем и определенная по его приборам учета;

$G_{\text{к}}$ - масса возвращенного потребителем конденсата, определенная по его приборам учета;

$h_{\text{к}}$ - энтальпия конденсата в конденсатопроводе в источнике теплоты;

$h_{\text{хв}}$ - энтальпия холодной подпиточной в источнике теплоты.

5.2.3. Основные требования к приборам учета тепловой энергии

Узел учета тепловой энергии оборудуется средствами измерения (теплосчетчиками, водосчетчиками, тепловычислителями, счетчиками пара, приборами, регистрирующими параметры теплоносителя и др.), которые должны быть зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений.

При использовании для учета тепловой энергии теплосчетчиков, у которых измерение расхода теплоносителя осуществляется методом переменного перепада давления на сужающих устройствах (в соответствии с требованиями РД 50-213-83), узел учета аттестуется в индивидуальном порядке Госстандартом.

Каждый прибор учета должен проходить поверку с периодичностью, предусмотренной для него Госстандартом. Приборы учета, у которых истек срок действия поверки или сертификации, а также исключенные из реестра средств измерений, к эксплуатации не должны допускаться.

Выбор приборов для использования на узле учета источника теплоты обычно осуществляет энергоснабжающая организация при согласовании с Госэнергонадзором.

Выбор же приборов для использования на узле учета потребителя осуществляет потребитель по согласованию с энергоснабжающей организацией.

Приборы узла учета защищаются от несанкционированного вмешательства в их работу, нарушающего достоверный учет тепловой энергии, массы теплоносителя и регистрацию его параметров.

Все приборы, используемые при коммерческом учете теплоносителей должны полностью соответствовать метрологическим требованиям при определенных условиях эксплуатации.

Теплосчетчики должны обеспечивать измерение тепловой энергии горячей воды с относительной погрешностью не более:

- 5 %, при разности температур в подающем и обратном трубопроводах от 10 до 20 °С;
- 4 %, при разности температур в подающем и обратном трубопроводах более 20 °С.
- Теплосчетчики должны обеспечивать измерение тепловой энергии пара с относительной погрешностью не более:
- 5% в диапазоне расхода пара от 10 до 30 %;
- 4% в диапазоне расхода пара от 30 до 100 %.

Водосчетчики должны обеспечивать измерение количество теплоносителя с относительной погрешностью не более 2 % в диапазоне расхода воды и конденсата от 4 до 100 %.

Счетчики пара должны обеспечивать измерение массы теплоносителя с относительной погрешностью не более 3% в диапазоне расхода пара от 10 до 100%.

Для прибора учета, регистрирующего температуру теплоносителя, абсолютная погрешность измерения температуры Δt , °С не должна превышать значений, определяемых по формуле:

$$\Delta t = \pm (0,6 + 0,004 \cdot t), \quad (5.9)$$

где t - температура теплоносителя.

Приборы учета, регистрирующие давление теплоносителя, должны обеспечивать измерение его с относительной погрешностью не более 2 %.

Приборы учета, регистрирующие время, должны обеспечивать измерение текущего времени с относительной погрешностью не более 0,1 %.

5.3. Приборы учета тепловой энергии

В настоящее время на объектах жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) в качестве приборов учета тепла используют теплосчетчики, которые имеют различные методы измерений, метрологические и технические характеристики, условия монтажа и эксплуатации и т.д. Поэтому правильный выбор теплосчетчика является непростой задачей.

Различают следующие виды теплосчетчиков:

- тахометрические;
- электромагнитные;
- ультразвуковые;
- вихревые,

т.е. тип теплосчетчика определяется типом измерителя расхода.

Тахометрические теплосчетчики (крыльчатые, турбинные, винтовые) являются механическими приборами и являются наиболее простыми. Как было отмечено ранее, принцип действия механических теплосчетчиков основан на преобразовании поступательного движения потока жидкости во вращательное движение измерительной части. Механические теплосчетчики состоят из тепловычислителя и механических роторных или крыльчатых водосчетчиков. Это пока наиболее дешевые теплосчетчики, но при оценке их стоимости

необходимо обязательно учитывать стоимость специальных фильтров, которые устанавливаются перед каждым механическим теплосчетчиком. В результате, цена таких комплектов на 10-15% ниже теплосчетчиков других типов, но только для условных диаметров трубопровода не более 32 мм. Для трубопроводов большего диаметра цена механических и других теплосчетчиков практически равна, а зачастую бывает и выше.

К недостаткам механических теплосчетчиков относится невозможность их использования при повышенной жесткости воды, присутствии в ней мелких частиц окислы, ржавчины и накипи, которые забивают фильтры и механические расходомеры. По этим причинам установка механических расходомеров рекомендуется только в квартирах, небольших частных домах и т.п. Кроме того, механические расходомеры создают наибольшие потери давления воды по сравнению с расходомерами других типов.

Электромагнитные теплосчетчики, в основе которых лежат электромагнитные расходомеры используют способность измеряемой жидкости возбуждать электрический ток при ее движении в магнитном поле. Электромагнитные теплосчетчики производят вычисление тепловой мощности и тепловой энергии на основе данных об объемном расходе и объеме теплоносителя, температур на прямом и обратном трубопроводе с учетом изменения теплоемкости теплоносителя при изменении разности температур на входе и выходе. Поскольку при этом возникают малые величины тока, то электромагнитные теплосчетчики очень чувствительны к качеству монтажа, условиям эксплуатации.

Недостаточно качественное соединение проводов, появление дополнительных сопротивлений в соединениях, наличие примесей в воде, особенно соединений железа, резко увеличивают погрешности показаний этих приборов.

Ультразвуковые теплосчетчики работают на принципе изменения времени прохождения ультразвукового сигнала от источника до приемника сигналов, которое зависит от скорости потока жидкости. Ультразвуковые

теплосчетчики показали высокую свою надежность при измерении расхода чистой и однородной жидкости. Однако, при протекании жидкостей, имеющих посторонние включения - окалина, частицы накипи, песок, воздушные пузыри и при неустойчивом расходе, а также загрязнении внутренней поверхности трубопроводов они дают существенные неточности показаний.

Кроме стандартных функций по измерению расхода, объема теплоносителя, его температуры и давления, вычисления потребленного или произведенного тепла, ультразвуковые теплосчетчики также могут иметь функцию регулирования подачи теплоносителя по двум независимым каналам.

Вихревые теплосчетчики работают на принципе широко известного природного явления - образование вихрей за препятствием, стоящим на пути потока. Конструктивно вихревые теплосчетчики состоят из треугольной призмы, вертикально установленной в трубе, измерительного электрода, вставленного в трубу далее по течению жидкости, и установленного снаружи трубы постоянного магнита.

Вихревые теплосчетчики могут быть установлены на горизонтальных и вертикальных участках трубопроводов и менее требовательны к длине прямых участков до и после расходомера.

Среди теплосчетчиков различают единые и комбинированные.

Единые теплосчетчики состоят из блоков, которые не сертифицированы как отдельные средства измерения, поэтому они поверяются как единое целое.

Комбинированный (составной) теплосчетчик состоит из блоков, каждый из которых является сертифицированным средством измерения со своей методикой поверки.

Теплосчетчики могут быть *одноканальными* - с одним преобразователем расхода и *многоканальными* - с двумя и более преобразователями расхода. Первые применяются в закрытых системах теплоснабжения, а вторые - в открытых системах теплоснабжения и на источниках теплоты.

Все теплосчетчики состоят из трех блоков, соединенных между собой линиями связи: преобразователи температуры, преобразователи расхода и

информационно-вычислительный блок. Сигналы с преобразователей расхода и температуры поступают в информационно-вычислительный блок (тепловычислитель), где обрабатываются в соответствии с заданным алгоритмом. Этот блок конструктивно объединен с преобразователями расхода и температуры или может быть использован отдельно.

В настоящее время выпускается достаточно много различных типов тепловычислителей, различающихся только количеством измерительных каналов. Поэтому при выборе тепловычислителя в составе комбинированного теплосчетчика следует ориентироваться на конфигурацию узла учета, т.е. на количество измерительных каналов. Наиболее часто в ЖКХ используются тепловычислители типов *СПТ*, *ВКТ*, *Мультикал*, *Мульти-дата*, *Суперкал*.

На работу теплосчетчиков в реальных условиях эксплуатации влияют различные внешние факторы. Особенно сильно это влияние сказывается на работе расходомеров, входящих в состав теплосчетчиков. По интенсивности влияния внешние факторы можно расположить в следующем порядке:

- изменение сечения измерительного участка трубопровода вследствие его «обрастания»;
- качество теплоносителя (содержание в жидкости механических и газообразных примесей);
- отложение загрязнений на внутренних поверхностях измерительного участка и датчиках, приводящее к искажению выходного сигнала;
- пульсации давления и расхода, вызванные местными гидравлическими сопротивлениями и другими факторами;
- несбалансированность фаз по нагрузкам и отсутствие качественного заземления, приводящие к возникновению электрического потенциала на трубопроводах;
- вибрация трубопроводов;
- температура теплоносителя.

Наиболее сильно влияет на метрологические характеристики теплосчетчиков, расходомеры которых работающих по принципу «площадь – скорость» (вихревые, ультразвуковые) сужение сечения трубопроводов. В этом случае из-за сужения диаметра измерительного участка расходомера скорость в нем возрастает, а, следовательно, увеличивается и объемный расход. Это связано с тем, что в память расходомера вводится первоначальный диаметр измерительного участка, который не корректируется в процессе эксплуатации расходомера из-за отсутствия точных методов измерения толщины осадочного слоя.

В меньшей степени «обрастание» сказывается на метрологических характеристиках электромагнитных расходомеров, т.к. их измерительный канал футерован фторопластом и его сечение в процессе эксплуатации практически не изменяется.

Изменение сечения измерительного участка трубопровода практически не сказывается на метрологических характеристиках классических электромагнитных расходомеров, т.к. их измерительный участок футерован диэлектриком (фторопласт, металлокерамика и т. д.). Для того, чтобы избавиться от дополнительной погрешности, возникающей в процессе эксплуатации ультразвуковых и вихревых расходомеров из-за изменения сечения их измерительного участка, его либо футеруют, например, эмалью, либо изготавливают из материала, который не «обрастает».

Качество теплоносителя влияет на метрологические характеристики практически всех типов расходомеров. Наличие в жидкости газообразных примесей особенно сильно сказывается на метрологических характеристиках ультразвуковых, тахометрических и вихревых (с ультразвуковым съемом сигнала) расходомеров.

Для устойчивой работы ультразвуковых расходомеров содержание газообразной фазы в общем объеме протекающего теплоносителя не должно превышать 1%. В противном случае возникает дополнительная погрешность, которая может достигать 3-12%.

Наличие газовой фазы в теплоносителе значительно влияет на метрологические характеристики тахометрических расходомеров. Например, содержание 5% по объему воздуха в теплоносителе может дать дополнительную погрешность при измерении расхода около 10%.

Метрологические характеристики электромагнитных и вихревых расходомеров также зависят от наличия газообразной фазы, хотя статистических данных по этому вопросу нет.

Наличие в теплоносителе механических примесей в виде твердых ферромагнитных частиц, продуктов коррозии и т. п. особенно сильно влияет на метрологические характеристики тахометрических расходомеров и вихревых расходомеров с электромагнитным съемом сигнала типа ВЭПС. Метрологические характеристики вихревых расходомеров с электромагнитным съемом сигнала ВЭПС очень сильно зависят от наличия в теплоносителе ферромагнитных частиц, налипающих на тело обтекания в зоне действия постоянного магнита, что приводит к искажению показаний расходомера. Так, погрешность расходомеров ВЭПС в процессе эксплуатации по мере налипания частиц может возрасти в среднем с 2 до 68%.

Налипание ферромагнитных частиц происходит при малых и средних расходах. При увеличении расхода до значений, близких к максимальному, эти частицы смываются потоком жидкости, и метрологические характеристики расходомера восстанавливаются. Причем без проведения специальных исследований отследить это волнообразное изменение метрологических характеристик расходомера ВЭПС невозможно.

Избавиться от дополнительных погрешностей, вызываемых наличием механических примесей в теплоносителе, можно, если перед расходомерами установить специальные магнитомеханические фильтры.

В процессе эксплуатации расходомеров на внутренней поверхности их измерительных участков, датчиках и электродах происходит отложение осадков и загрязнений в виде ржавчины, нефтепродуктов, железноводных бактерий и других загрязнений. Это приводит к сужению сечения

измерительного участка и, следовательно, изменению метрологических характеристик расходомеров, а также к искажению выходного сигнала и неконтролируемому изменению статической характеристики расходомеров. Кристаллические микропористые неорганические осадки влияют существенно меньше, чем аморфные и органические.

Пульсации давления и расхода теплоносителя, вызываемые большими местными гидравлическими сопротивлениями, особенно сильно влияют на работу вихревых расходомеров, которые не используют в процессе преобразования сигнала спектральные методы, позволяющие осуществлять его цифровую фильтрацию и выделять по определенным критериям основную рабочую частоту. Простой подсчет импульсов, генерируемых преобразователем, в случае зашумленного сигнала может привести к очень большой (десятки процентов) погрешности измерений расхода. К аналогичным результатам приводят электрические помехи сетевой частоты и ее гармоник при эксплуатации электромагнитных расходомеров.

Вибрации трубопроводов, обусловленные их некачественной подвеской и прокладкой, не допустимы для ультразвуковых расходомеров с многоходовым трактом луча, т.к. могут полностью расфокусировать систему отражателей. Они также плохо сказываются на работе вихревых расходомеров, не имеющих систему фильтрации шумов.

Температура теплоносителя влияет на метрологические характеристики практически всех типов расходомеров. Однако достоверных статистических данных о влиянии температуры измеряемой среды на погрешность измерения расхода нет. От температуры теплоносителя сильно зависят метрологические характеристики двухканальных теплосчетчиков. В процессе эксплуатации при неизменных нагрузках потребителя разница в массе теплоносителя, проходящего по подающему и обратному трубопроводам, постоянно возрастает (теплосчетчики с тахометрическими расходомерами) или уменьшается и даже становится отрицательной (теплосчетчики с электромагнитными расходомерами). Это объясняется только влиянием

температуры: расходомер, установленный на подающем трубопроводе, работает при температуре 70-130°C, а установленный на обратном трубопроводе - при температуре 30-70°C.

При выборе теплосчетчиков необходимо учитывать их технические, эксплуатационные и метрологические характеристики.

Большинство теплосчетчиков обеспечивают измерение массы теплоносителя с относительной погрешностью 2%, что соответствует установленной норме. Однако часто, например, в открытых системах или системах горячего водоснабжения с циркуляцией необходимо измерять не массу теплоносителя, а разность масс. В этом случае необходимо выбирать более точные приборы - с относительной погрешностью 0,5 и 1,0%.

Большинство теплосчетчиков имеют диапазон измерений расхода не более 1:25. В этих приборах наибольший расход соответствует скорости потока воды 10 м/с и более. Наименьший же расход, который можно корректно измерить, соответствует скорости - не более 0,4 м/с. На практике из-за малых напоров в системе теплоснабжения у потребителей фактическая скорость воды колеблется в пределах 0,1-0,5 м/с, поэтому не все теплосчетчики могут работать в таком диапазоне. Кроме того, при переходе с зимнего на летний режим работы системы теплоснабжения расход уменьшается в 3-5 раз. В этом случае диапазон измерения 1:25 недостаточен и возникает необходимость установки двух комплектов приборов. Поэтому необходимо выбирать теплосчетчики с диапазоном измерения 1:50, 1:100, 1:200 и более, погрешность измерения которых в данном диапазоне не превышает 2%.

Преобразователи расхода, входящие в состав теплосчетчиков и устанавливаемые на трубопроводах, обладают гидравлическим сопротивлением. Поэтому при малых напорах необходимо использовать полнопроходные (без занижения диаметра трубопровода) электромагнитные или ультразвуковые преобразователи, которые не создают потерь давления.

Многие типы преобразователей расхода для корректных измерений требуют наличия длинных прямых участков до и после места их установки. Это актуально для ультразвуковых расходомеров и расходомеров переменного перепада давления. Но на практике при отсутствии приспособленных помещений не всегда имеется возможность удовлетворить это требование.

Современные теплосчетчики представляют собой комплексные измерительные системы, которые могут обслуживать учет одновременно по двум и более тепловым вводам и по магистрали горячего водоснабжения. В этом случае теплосчетчик становится универсальным и может удовлетворить требования самых разнообразных потребителей теплоты.

Большинство современных теплосчетчиков снабжено системой самодиагностики, которая обеспечивает периодическую автоматическую проверку состояния прибора и выдает сведения о характере возникших отказов, времени начала отказов и их длительности. Одновременно эти приборы могут регистрировать нештатные ситуации, возникающие в системе теплоснабжения, такие, как выход текущего значения расхода за пределы установленного для прибора диапазона или за пределы введенных в память прибора установок, отключение электропитания, небаланс масс в трубопроводах и т.д.

При выборе теплосчетчиков необходимо принимать во внимание качество теплоносителя. Если существует вероятность наличия в воде механических и газовых примесей, то не рекомендуется использовать ультразвуковые и тахометрические теплосчетчики. В этом случае предпочтительнее электромагнитные и вихревые теплосчетчики. Если в воде имеются ферромагнитные примеси, не рекомендуется использовать тахометрические теплосчетчики и вихревые с электромагнитным съемом сигнала. При наличии в сетевой воде примесей, образующих пленки или осадки на внутренней поверхности трубопроводов, не рекомендуется использовать электромагнитные теплосчетчики.

Практически все современные теплосчетчики осуществляют архивирование информации с возможностью последующего извлечения архивных данных непосредственно с прибора либо с помощью дополнительных терминалов. При этом важное значение имеет возможность вывода архивных данных на табло прибора.

Стоимость теплосчетчиков колеблется в широком диапазоне и зависит от ряда факторов: тепловой нагрузки, количества каналов измерения, наличия дополнительного оборудования, поставщика и других факторов.

Контрольные вопросы

1. Запишите алгоритм, используемый для расчета количества теплоты, измеряемой теплосчетчиком.
2. Что называется тепломером, а что теплосчетчиком?
3. Для каких целей организуется учет и регистрация отпущенной или потребленной тепловой энергии?
4. Какие параметры измеряются в узлах учета тепловой энергии?
5. Где рекомендуется оборудовать узлы учета тепловой энергии для источника и потребителя тепла?
6. Чем отличаются узлы учета тепловой энергии для водяного и парообразного теплоносителей?
7. Запишите алгоритм расчета количества тепловой энергии пара, отпущенной источником теплоты?
8. Какие параметры должны измеряться у потребителей тепла с открытыми и закрытыми системами теплоснабжения?
9. Какие основные требования выдвигаются к приборам учета тепловой энергии?
10. Перечислите основные типы приборов учета тепловой энергии.
11. Какие факторы влияют на точность измерения тепловых счетчиков в условиях эксплуатации?
12. Для каких систем теплоснабжения применяют одноканальные и многоканальные теплосчетчики?
13. Для какого из теплосчетчиков с диапазонами измерения расхода 1:25 или 1:100 погрешность измерения будет меньшей?

Конструкции сужающих устройств и соотношения их основных размеров.

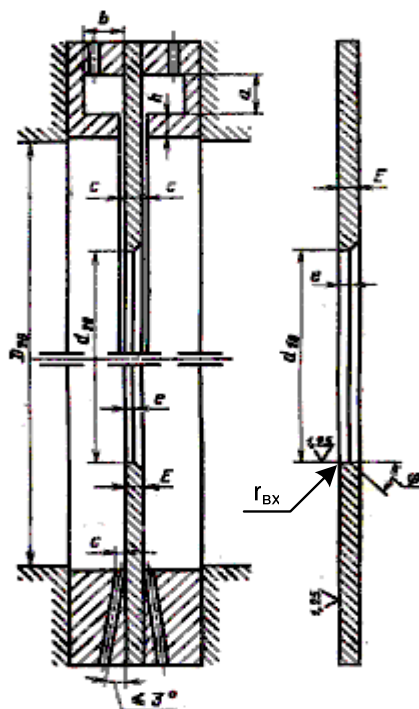


Рис.П.1.1 - Диафрагма с угловым способом отбора перепада давления

D_{20} - внутренний диаметр трубопровода при 20 °С; d_{20} -диаметр отверстия диафрагмы при 20 °С; E - толщина диска диафрагмы; e - длина цилиндрической части отверстия диафрагмы; c - диаметр отверстия для отбора импульсов давления или толщина кольцевой щели (для диафрагм с кольцевыми камерами); a и b – высота и ширина кольцевой камеры; h - толщина стенки камеры; φ - угол скоса конической части отверстия диафрагмы; $r_{вх}$ - радиус закругления входной кромки.

Основные соотношения для диафрагм с угловым способом отбора перепада давления:

$E \leq 0,05 D_{20}$; $0,005 D_{20} \leq e \leq 0,02 D_{20}$; $30^0 \leq \varphi \leq 45^0$; $a \times b \geq \frac{1}{2} \pi \cdot c \cdot D_{20}$;
 $c \leq 0,03 D_{20}$ (при $m \leq 0,45$) и $0,01 D_{20} \leq c \leq 0,02 D_{20}$ (при $m > 0,45$);
 для чистых жидкостей и газов – $1 \text{ мм} \leq c \leq 12 \text{ мм}$; $r_{вх} \leq 0,0004 d_{20}$.

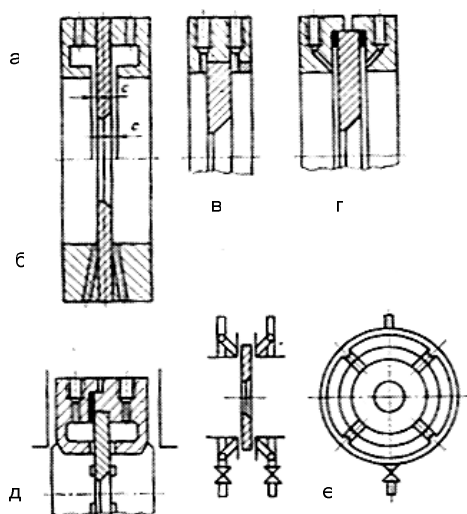


Рис.П.1.2 - Виды отводов при угловом способе отбора перепада давления для диафрагм:

а,д- с кольцевыми камерами; е-с трубчатой выносной камерой; б, в,г- бескамерные диафрагмы.

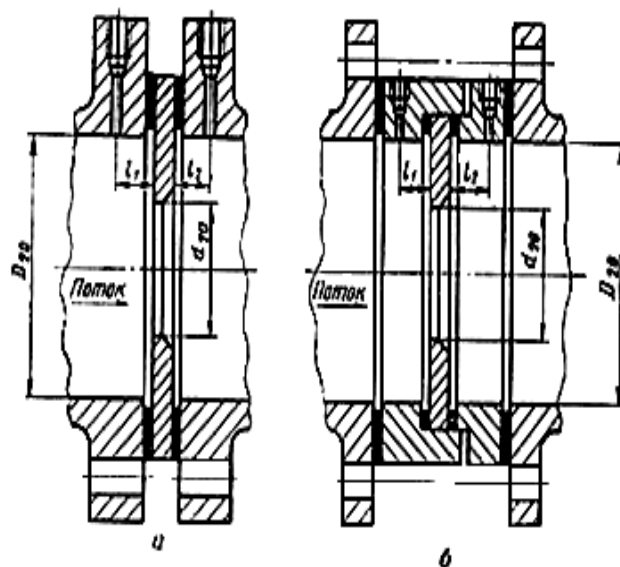


Рис.П.1.3 - Фланцевый способ отбора перепада давления:

а-обычный; б- с использованием обойм.

Соотношения для диафрагм с фланцевым способом отбора перепада давления:

$$l_1 = l_2 = 25,4 \pm A \text{ мм},$$

где l_1 , l_2 - расстояние точки отбора импульса давления от входной и выходной плоскости диафрагмы, соответственно;

$$A = \begin{cases} 0,5 \text{ мм} & \text{при } m > 0,36 \text{ и } 58 \text{ мм} < D < 150 \text{ мм}; \\ 1 \text{ мм} & \text{при } \begin{cases} m \leq 0,36; \\ m > 0,36 \text{ и } 50 \text{ мм} \leq D \leq 58 \text{ мм}; \\ m > 0,36 \text{ и } 150 \text{ мм} \leq D \leq 760 \text{ мм}. \end{cases} \end{cases}$$

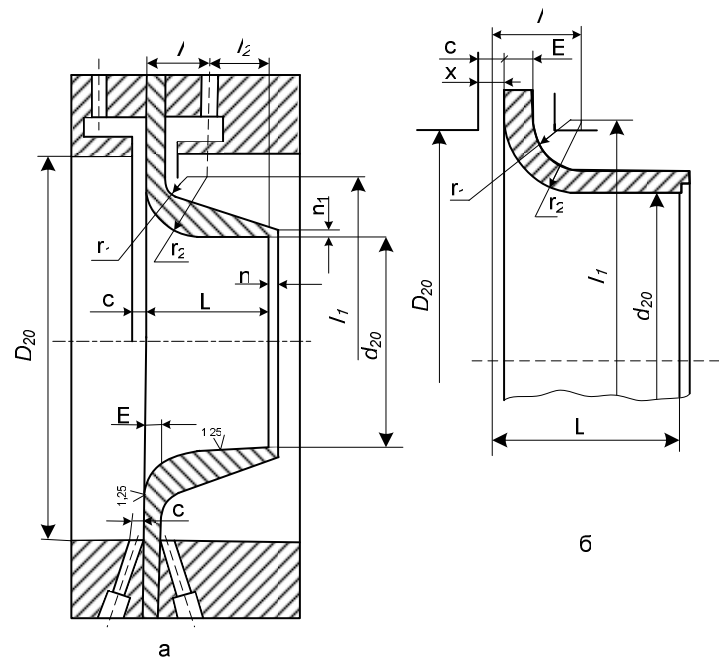


Рис.П.1.4 - Стандартные сопла:

а – для $m \leq 0,444$; б – для $m > 0,444$.

Соотношения параметров для стандартных сопел:

$$x = 0,2d_{20} - \sqrt{0,75d_{20}D_{20} - 0,25D_{20}^2 - 0,5225d_{20}^2}; r_1 = 0,2d_{20}; r_2 = 0,333d_{20}; l = 0,304d_{20};$$

$$l_1 = 1,5d_{20}; l_2 = 0,3d_{20}; n_1 \geq 0,03d_{20}; n < 0,03d_{20}; E \leq 0,1D_{20}; L = 0,604d_{20}.$$

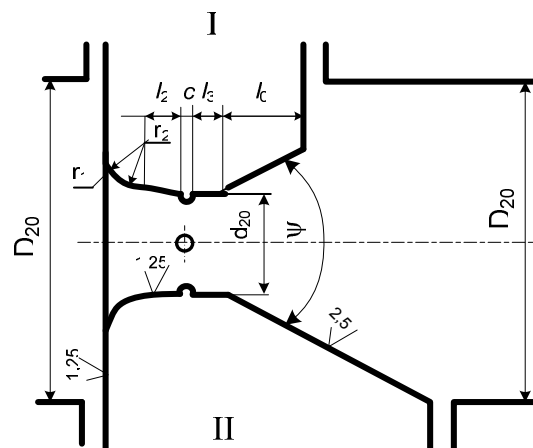


Рис.П.1.5 - Сопло Вентури

I – короткое; II – длинное для $m \leq 0,444$; при $m > 0,444$ профиль аналогичен соплу (см.рис. П.1.4 б)

Соотношения параметров для сопел Вентури:

$$l_2 = 0,3d_{20}; 0,4d_{20} \geq l_3 \geq 0,2d_{20}; 5^\circ \leq \Psi \leq 30^\circ; l_0 \geq d_{20}; 3 \text{ мм} \leq c \leq 0,13d_{20}.$$

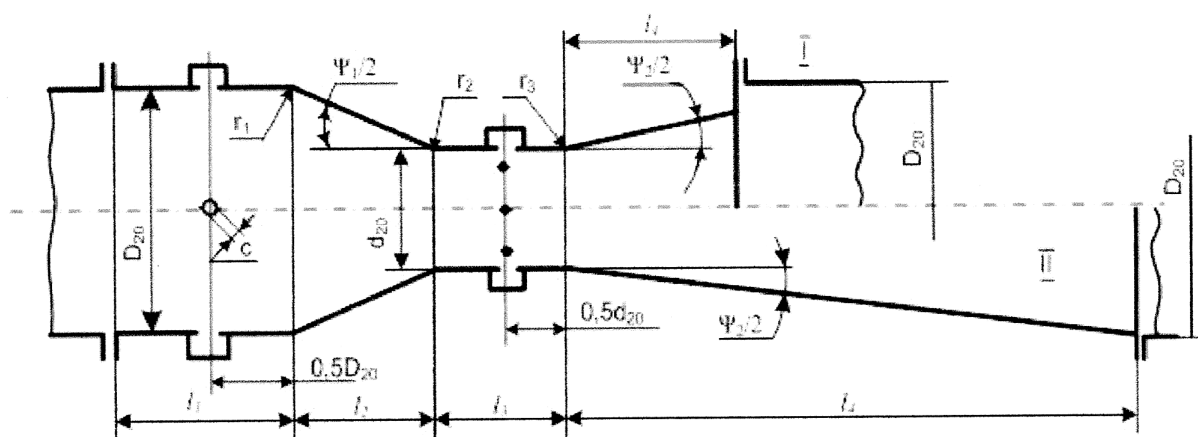


Рис. П.1.6 - Трубы Вентури:
I – короткая; II – длинная.

Соотношения параметров для труб Вентури:

конструктивный параметр	Типы труб Вентури		
	А	Б	В
Минимальная длина входного патрубка, l_1	D_{20}	D_{20} или $0,25 D_{20} \pm 250$ мм (для $D_{20} \geq 250$ мм)	D_{20}
Центральный угол входного конуса, Ψ_1	$21 \pm 1^\circ$	$21 \pm 1^\circ$	$21 \pm 1^\circ$
Длина входного конуса, l_2	$2,7(D_{20} - d_{20})$	$2,7(D_{20} - d_{20})$	$2,7(D_{20} - d_{20})$
Длина горловины, l_3	d_{20}	d_{20}	d_{20}
Радиусы закругления	$r_1 = r_2 = r_3 \approx 0$	$r_1 = (1,35 - 1,6) D_{20}$ $r_2 = (3,6 - 5)d_{20}$; $r_3 = 10 D_{20}$	$r_1 = r_2 = r_3 = 0,25d_{20}$ или $r_1 = r_2 = r_3 \approx 0$
Относительная площадь, m	от 0,15 до 0,5	от 0,1 до 0,6	от 0,1 до 0,6
Диффузор: центральный угол Ψ_2 длина, l_4	для коротких труб 14- 20° ; (0,7 - 1) D_{20}	для длинных труб 7 - 8° определяется геометрическим расчетом	

Абсолютная шероховатость внутренней поверхности для различных трубопроводов.

Материал и вид труб	Состояние поверхности труб и условия эксплуатации	k, мм
Стальные цельнотянутые трубы	Новые, не бывшие в эксплуатации	0,02-0,1
	Изготовленные волочением в холодном состоянии	0,03
	Очищенные после ряда лет эксплуатации	до 0,4
	Изготовленные горячим волочением	0,05-0,1
	Битумизированные	0,04
	Паропроводы перегретого пара при наличии деаэрации и химической очистки	0,1
	Паропроводы насыщенного пара при наличии деаэрации и химической очистки	0,02
	Паропроводы и конденсатопроводы, работающие периодически с открытой системой конденсата	0,5
	Конденсатопроводы, работающие периодически, и водяные теплопроводы без деаэрации и химической очистки	1,0
	Газопроводы после одного года эксплуатации	0,12
	Газопроводы после нескольких лет эксплуатации, корродированные или с небольшими отложениями	0,15-1,0
	Водопроводные трубы, находившиеся в эксплуатации	1,2-1,5
Стальные цельносварные трубы	Умеренно корродированные трубы или с небольшими отложениями накипи	0,4
	Новые или старые трубы в хорошем состоянии	0,04-0,1
	Новые спиральносварные трубы	0,1
	Трубы с гальваническим покрытием	0,13
	Трубы бывшие в эксплуатации с равномерной коррозией	0,15
	Магистральные газопроводы после ряда лет эксплуатации	0,5
Стальные цельносварные трубы	Магистральные газопроводы более 20 лет эксплуатации	1,1
	Загрязненные в процессе эксплуатации, но не корродированные водяные трубы	0,95-1,0
	Трубы со слабыми отложениями	1,5
	Значительно корродированные трубы	2,0
Стальные оцинкованные трубы	Новые трубы с чистой оцинковкой	0,07-0,1
	Трубы с обычной оцинковкой	0,1-0,15
	Новые трубы из листовой стали	0,15
	Трубы из листовой стали бывшие в эксплуатации	0,18
Чугунные трубы	Новые трубы	0,25-1,0
	Новые битумизированные трубы	0,1-0,15
	Асфальтированные трубы	0,12-0,3
	Трубы, бывшие в эксплуатации, корродированные или с отложениями на внутренней поверхности	1,0-1,5
	Трубы, очищенные после многих лет эксплуатации	0,3-1,5
	Сильно корродированные трубы	до 3,0
Асбоцементные трубы	Новые трубы с изоляцией	0,03
	Новые трубы без изоляции	0,05-0,1
	Средние трубы	0,6
Полиэтиленовые трубы	Новые трубы	до 0,02

тис. грн.

Физико-химические свойства жидкостей и газов, используемых в качестве энергоносителей.

Таблица П.3.1

Свойства некоторых газов.

наименование газа	химическая формула	Молекулярный вес μ , кг/кмоль	газовая постоянная R , Дж/кг·К	Критические параметры				ρ_0 , кг/м ³ $t = 0^\circ\text{C};$ $P = 10^5\text{Па}$	дин.вязкость $\mu \cdot 10^4$, сПз ($t = 0^\circ\text{C}$)	показатель адиабаты k $t = 0^\circ\text{C};$ $P = 10^5\text{Па}$	постоянная Сезерланда-С
				P_K МПа	T_K , К	$\rho_K = 1/v_K$, кг/м ³	коэффициент сжимаемости Z_K				
Азот	N ₂	28,016	296,749	3,393	126,05	311	0,270	1,2342	16,52	1,40	104
Аммиак	NH ₃	17,031	488,175	11,297	405,55	235	0,244	0,7613	9,16	1,31	503
Хлор	Cl ₂	70,914	117,288	7,698	417,15	573	0,274	3,18	12,27	1,34	330
Сернистый газ	SO ₂	64,06	129,84	7,885	430,45	524	0,269	2,882	11,58	1,27	-
Двуокись углерода	CO ₂	44,01	188,8	7,355	304,15	460	0,280	1,951	13,75	1,30	254
Метан	CH ₄	16,04	518,372	4,628	190,65	162	0,290	0,7084	10,22	1,32	164
Этан	C ₂ H ₆	30,7	276,744	4,962	308,15	210	0,277	1,338	8,51	1,20	252
Пропан	C ₃ H ₈	44,09	188,778	4,246	369,95	226	0,270	1,9779	7,46	1,14	278
Кислород	O ₂	32,00	259,778	5,041	154,35	430	0,279	1,4103	19,11	1,4	125
Окись углерода	CO	28,01	296,945	3,491	132,95	301	0,293	1,2336	16,59	1,4	101,2
Водород	H ₂	2,0156	4121,735	1,294	33,25	31	0,303	0,0898	8,35	1,41	84,4
Водяной пар	H ₂ O	18,0	461,5	22,128	647,3	0,00317	-	0,7496	-	-	-

Таблица П.3.2.

Средний коэффициент теплового расширения некоторых жидкостей

Жидкость	$\beta \times 10^5$	Жидкость	$\beta \times 10^5$	Жидкость	$\beta \times 10^5$	Жидкость	$\beta \times 10^5$
Анилин	85	Раствор CaCl ₂ , 41%	46	Ксилол	101	Спирт этиловый	110
Бензин	125	Раствор NaCl, 26%	44	Керосин	100	Толуол	109
Бензол	124	Серная кислота	57	Масло парафиновое	90	Уксусная кислота	107
Вода	10	Скипидар	94	Пентан	159	Хлороформ	126
Глицерин	53	Спирт метиловый	122	Раствор CaCl ₂ , 6%	25	Эфир диэтиловый	163

Таблица П.3.3.

Динамическая вязкость воды.

Температура, °C	Вязкость $\mu \times 10^3$, Па·с	Температура, °C	Вязкость $\mu \times 10^3$, Па·с
0	1.792	50	0.5494
5	1.519	55	0.5064
10	1.308	60	0.4688
15	1.14	65	0.4355
20	1.005	70	0.4061
20.2	1.000	75	0.3799
25	0.8937	80	0.3565
30	0.8007	85	0.3355
35	0.7225	90	0.3165
40	0.656	95	0.2962
45	0.5988	100	0.2838

Таблица П.3.4.

Коэффициент объемного расширения воды.

Температура, °C	$\beta \times 10^5$, °C ⁻¹	Температура, °C	$\beta \times 10^5$, °C ⁻¹
5	1,5	70	58
10	9	80	64
20	21	90	70
30	30	100	75
40	39	120	85
50	46	140	97
60	52	160	110

Таблица П.3.5.

Показатель изэнтропии для водяного пара.

Р, МПа	Температура, °C								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
0,0	1,323	1,3178	1,312	1,3060	1,300	1,2940	1,2881	1,2823	1,2766
0,1	1,320	1,316	1,311	1,305	1,299	1,293	1,287	1,282	1,276
0,5	-	-	1,306	1,301	1,297	1,292	1,286	1,281	1,276
1,0	-	-	1,299	1,298	1,295	1,291	1,285	1,281	1,276
2,5	-	-	-	1,288	1,287	1,286	1,284	1,280	1,276
5,0	-	-	-	-	1,285	1,284	1,283	1,280	1,276
10,0	-	-	-	-	-	1,285	1,284	1,283	1,278
15,0	-	-	-	-	-	-	1,290	1,288	1,283
20,0	-	-	-	-	-	-	-	1,299	1,295
25,0	-	-	-	-	-	-	-	1,330	1,320
30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	1,350
35,0	-	-	-	-	-	-	-	-	1,380

Таблица П.3.6.

Плотность некоторых жидкостей при 0-20 °C.

Жидкость	ρ , кг/м ³	Жидкость	ρ , кг/м ³	Жидкость	ρ , кг/м ³	Жидкость	ρ , кг/м ³
Бензин	760	Вода	1000	Мазут	890-950	Метанол	800
Бензол	900	Керосин	850	Нефть	790-950	Этанол	790

Таблица П.3.7.

Показатель изэнтропии для воздуха.

Т, °С	Давление, МПа							
	0,1	1,0	2,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0
- 100	1,402	1,411	1,420	1,456	-	-	-	-
- 80	1,402	1,414	1,431	1,530	1,929	-	-	-
- 60	1,402	1,415	1,432	1,513	1,771	2,156	-	-
- 40	1,402	1,415	1,432	1,503	1,697	1,966	-	-
- 20	1,402	1,416	1,431	1,496	1,653	1,859	2,086	-
0	1,402	1,415	1,431	1,492	1,629	1,795	1,980	-
20	1,402	1,415	1,431	1,485	1,604	1,746	1,901	2,057
40	1,401	1,413	1,428	1,479	1,585	1,709	1,843	1,978
60	1,399	1,411	1,426	1,474	1,570	1,680	1,798	1,917
80	1,397	1,409	1,423	1,469	1,558	1,657	1,762	1,869
100	1,396	1,407	1,420	1,464	1,546	1,637	1,733	1,829
150	1,391	1,402	1,414	1,453	1,524	1,599	1,677	1,756
200	1,386	1,396	1,408	1,443	1,506	1,571	1,637	1,704
250	1,382	1,391	1,401	1,434	1,490	1,548	1,606	1,664
300	1,377	1,386	1,395	1,425	1,477	1,529	1,581	1,632
350								
400								

Таблица П.3.8.

Физические свойства воды при атмосферном давлении.

Т, °С	ρ , кг/м ³	i , Дж/кг×10 ⁻³	c_p , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \times 10^{-3}$	$\lambda \times 10^2$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	$\alpha \times 10^7$, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\sigma \times 10^4$, $\frac{\text{кг}}{\text{с}^2}$	Pr
0	1000	0	4,23	65,1	1,31	756	13,7
10	1000	41,9	4,19	57,5	1,37	762	9,52
20	998	83,8	4,19	59,9	1,43	727	7,02
30	996	126	4,18	61,8	1,49	712	5,42
40	992	168	4,18	63,4	1,53	697	4,31
50	988	210	4,18	64,8	1,57	677	3,54
60	983	251	4,18	65,9	1,61	662	2,98
70	978	293	4,19	66,8	1,63	643	2,55
80	972	335	4,19	67,5	1,66	626	2,21
90	965	377	4,19	68,0	1,68	607	1,95

Физические свойства некоторых металлов.

Таблица П.4.1.

Предел текучести материалов.

Марка стали	Предел текучести σ , МПа при 20 °С	Марка стали	Предел текучести σ , МПа при 20 °С
ВСтЗ	250	15ХМ	233
08	196	15Х5М	220
10	195	12Х17	245
15	225	15Х11МФ	490
20 и 20К	220	14Х17Н2	834
30	294	12Х18Н9Т	196
35	314	12Х18Н10Т	240
12МХ	220	15Х12ВНМФ	588
12ХМ	220	08Х18Н10Т	210
20Х23Н13	294	36Х18Н25С2	343

Таблица П.4.2.

Модуль упругости материалов.

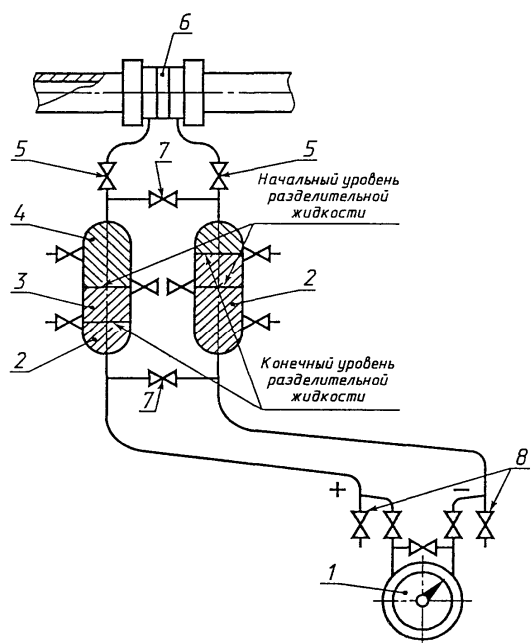
Тип стали	Модуль упругости, 10^{-3} МПа, при температуре, °С												
	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	700
Углеродистая и низколегированная	199	191	186	181	176	171	164	155	140	-	-	-	-
Теплоустойчивая и коррозионно-стойкая хромистая	215	215	205	198	195	190	184	178	171	163	154	140	-
Жаропрочная и жаростойкая аустенитная	200	200	199	197	194	190	185	180	174	167	160	152	132

Таблица П.4.3. Значения коэффициентов уравнения (4.13). для расчета температурного коэффициента расширения сталей.

Марка стали	a_e	b_e	c_e	Марка стали	a_e	b_e	c_e
8	10,9	7,7	2,4	12МХ	11,3	3,8	0,0
10	10,8	9,0	4,2	12Х1МФ	10,0	9,6	6,0
15	11,1	7,9	3,9	12Х17	9,4	7,4	6,0
15М	10,7	13,0	13,0	12Х18Н9Т	15,6	8,3	6,5
16М	11,1	8,4	3,7	12Х18Н10Т	15,6	8,3	6,5
20	11,1	7,7	3,4	14Х17Н2	9,4	7,5	7,8
20М	10,7	13,0	13,0	15ХМА	11,1	8,5	5,2
25	12,2	0,0	0,0	15Х1М1Ф	10,4	8,1	4,4
30	10,2	10,4	5,6	15Х5М	10,1	2,7	0,0
35	10,2	10,4	5,6	15Х12ЕНМФ	9,81	3,0	0,0
Х6СМ	10,1	2,7	0,0	17Х18Н9	15,7	5,7	0,0
Х7СМ	10,1	2,7	0,0	20Х23Н13	15,5	1,7	0,0
				36Х18Н25С2	12,0	10,0	5,4

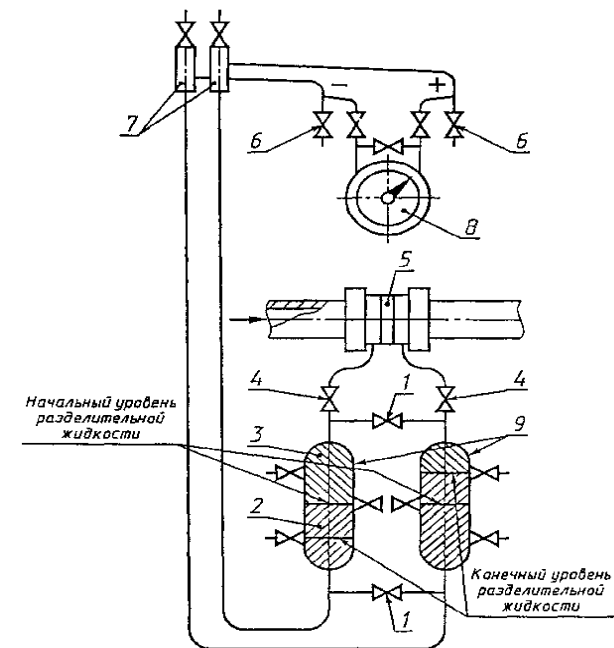
Примечание - Значения коэффициентов приведены для температурного диапазона от -200 до +700 °С. Для стали марки 12МХ температурный коэффициент приведен для температур от 0 до 100 °С.

Схемы подключения приборов к измерительному трубопроводу



а)

1- дифференциальный манометр; 2- сосуд разделительный; 3- жидкость разделительная;
4 - контролируемая жидкость; 5-запорный вентиль сужающего устройства; 6- сужающее устройство; 7- уравнивательный вентиль;
8 - продувочный вентиль



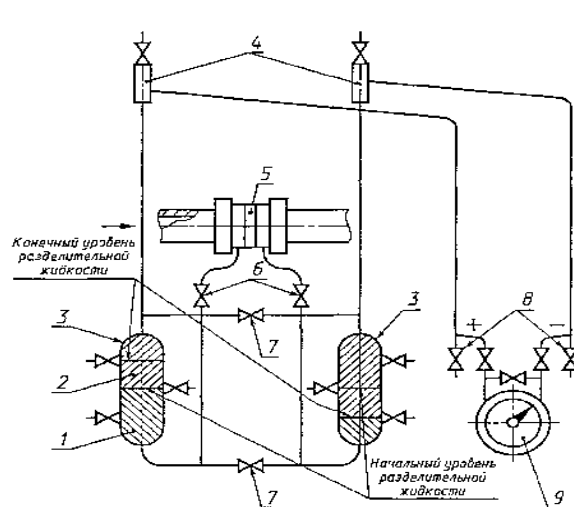
б)

1- уравнивательный вентиль; 2- жидкость разделительная; 3 - контролируемая жидкость; 4 - запорный вентиль;
5 - сужающее устройство; 6 - вентиль продувочный; 7- газосборник;
8- дифманометр; 9 - разделительный сосуд

Рис. П.5.1 - Схема измерения расхода жидкости, которая легче жидкости в разделительных сосудах:

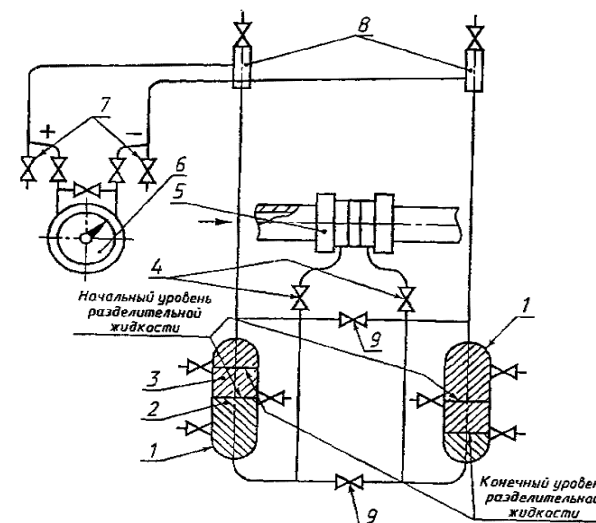
а- дифференциальный манометр расположен ниже сужающего устройства;

б- дифференциальный манометр расположен выше сужающего устройства.



а)

1 - контролируемая жидкость; 2 - жидкость; разделяющая;
3 - разделятельный сосуд; 4 - газосборник; 5 - сужающее устройство;
6 - запорный вентиль; 7 - уравнильный вентиль; 8 - продувочный
вентиль; 9 - дифференциальный манометр

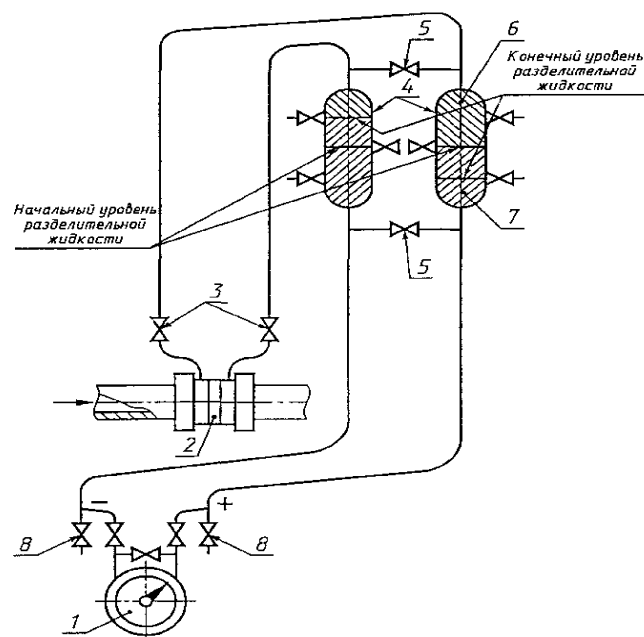


б)

1 - разделятельный сосуд; 2 - контролируемая жидкость; 3 - жидкость
разделяющая; 4 - запорный; 5 - сужающее устройство;
6 - дифференциальный манометр; 7 - продувочный вентиль;
8 - газосборник; 9 - уравнильный вентиль

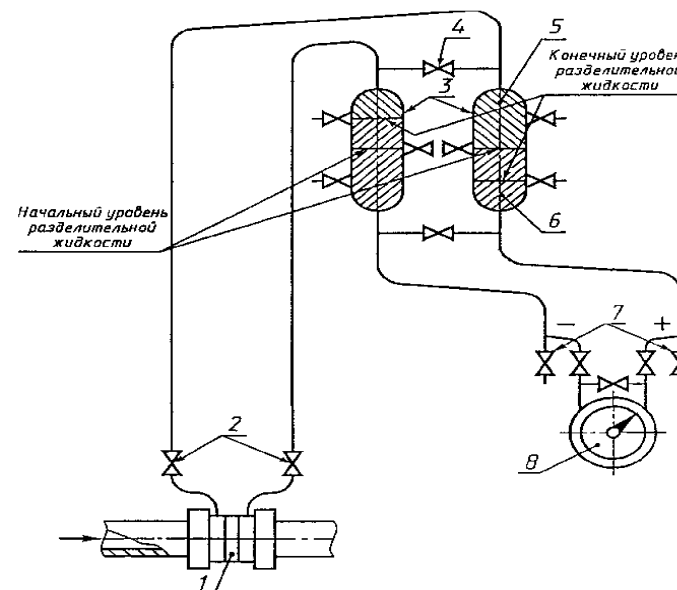
Рис. П.5.2 - Схема измерения расхода жидкости, которая тяжелее жидкости в разделятельных сосудах:

а - дифференциальный манометр расположен ниже сужающего устройства;
б - дифференциальный манометр расположен выше сужающего устройства.



а)

1 - дифманометр; 2 - сужающее устройство; 3 - запорный вентиль;
4 - разделительный сосуд; 5 - уравнильный вентиль;
6 - контролируемый газ; 7 - разделительная жидкость;
8 - продувочный вентиль

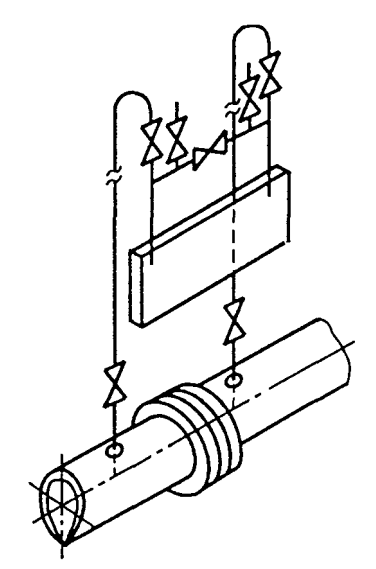


б)

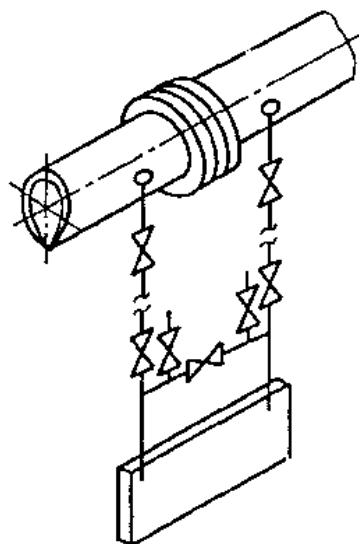
1 - сужающее устройство; 2 - запорный вентиль;
3 - разделительный сосуд; 4 - уравнильный вентиль;
5 - контролируемый газ; 6 - жидкость разделительная; 7 - продувочный вентиль; 8 - дифманометр

Рис. П.5.3 - Схемы установок разделительных сосудов при измерении расхода газа:

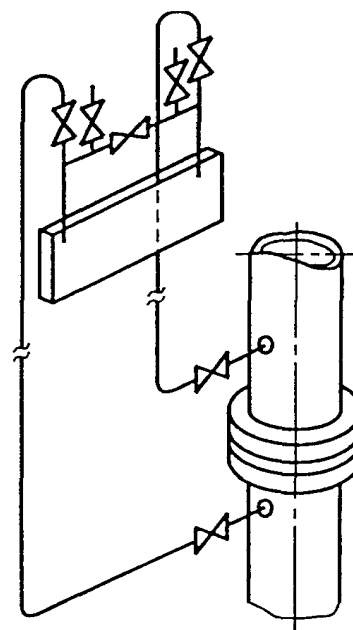
а - дифференциальный манометр расположен ниже сужающего устройства;
б - дифференциальный манометр расположен выше сужающего устройства.



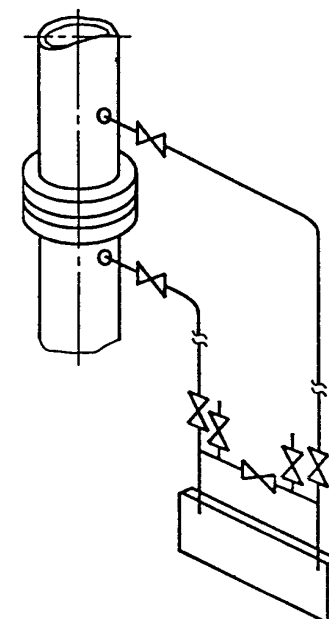
Дифманометр над трубопроводом



Дифманометр под трубопроводом

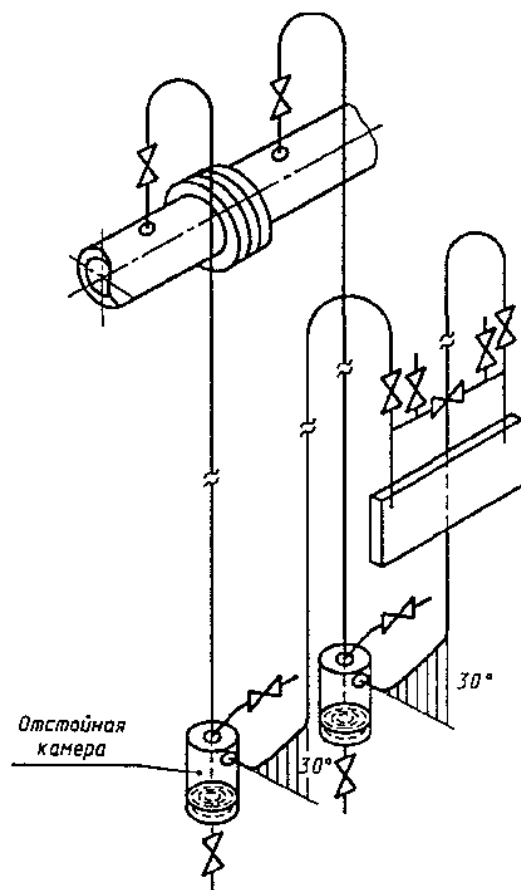


Дифманометр выше точки отбора
давления.
(вертикальный трубопровод)

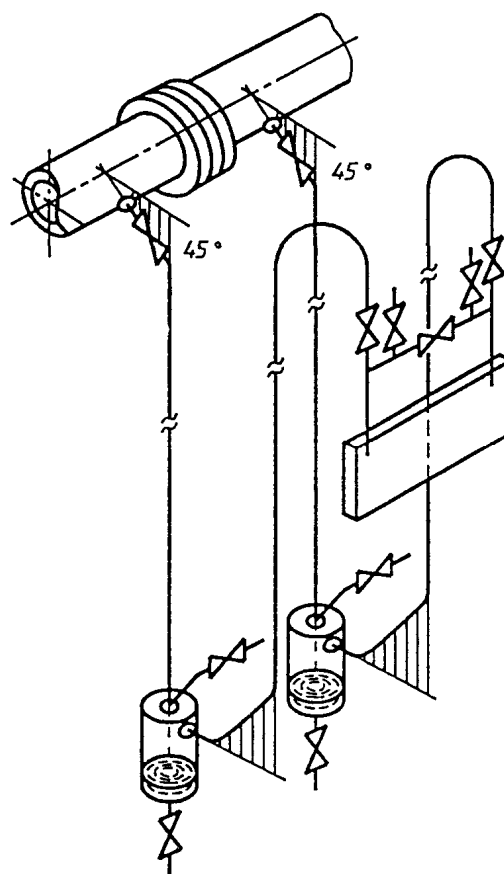


Дифманометр ниже точки отбора
давления.
(вертикальный трубопровод)

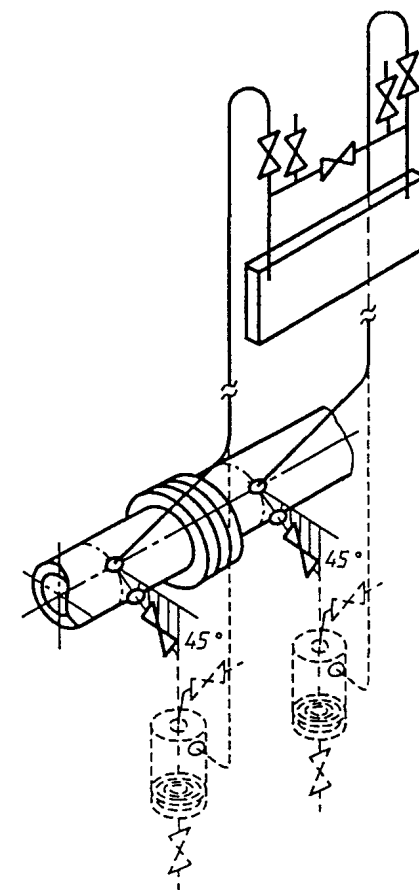
Рис. П.5.4 – Схемы установки измерительного прибора при замере чистого сухого газа



а - дифманометр под трубопроводом;

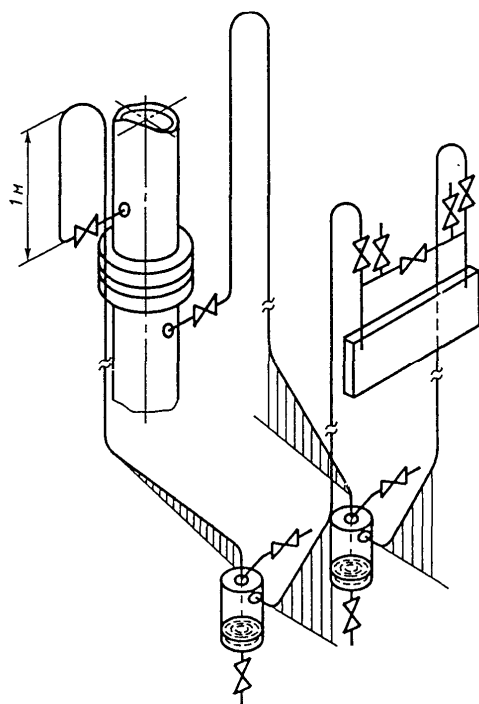


б - дифманометр под трубопроводом
(возможный вариант);



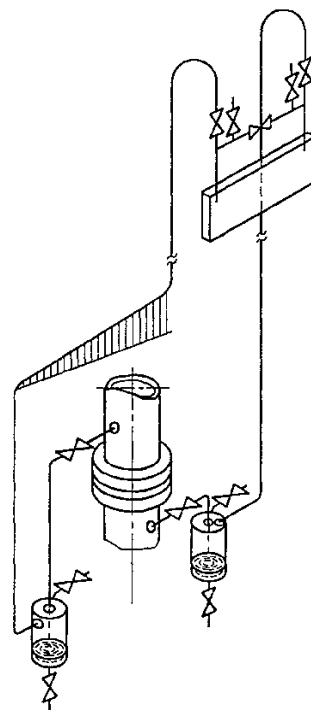
в - дифманометр над трубопроводом
(возможные два варианта);

Рис. П.5.5 – Схемы установки измерительного прибора при замера чистого влажного газа

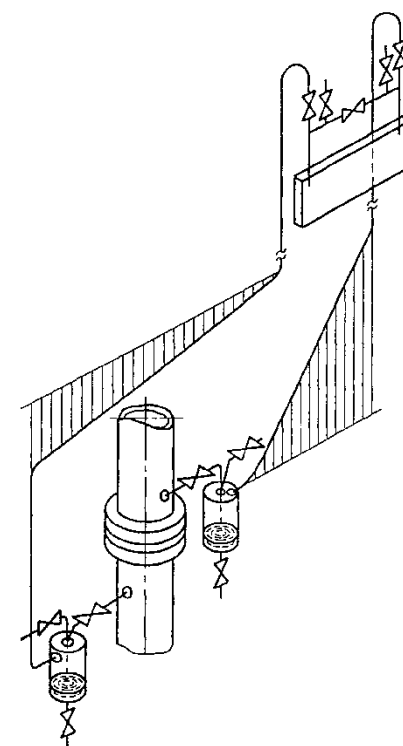


а - дифманометр ниже точек отбора давления;

Наклон двух соединительных трубок одинаков.



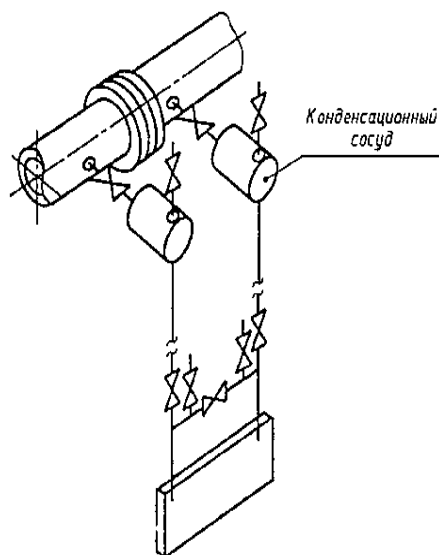
б- дифманометр выше точек отбора давления (вариант 1);



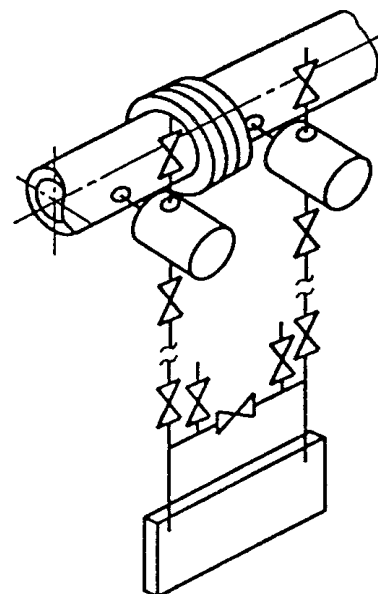
в - дифманометр выше точек отбора давления (вариант 2);

Наклон двух соединительных трубок одинаков

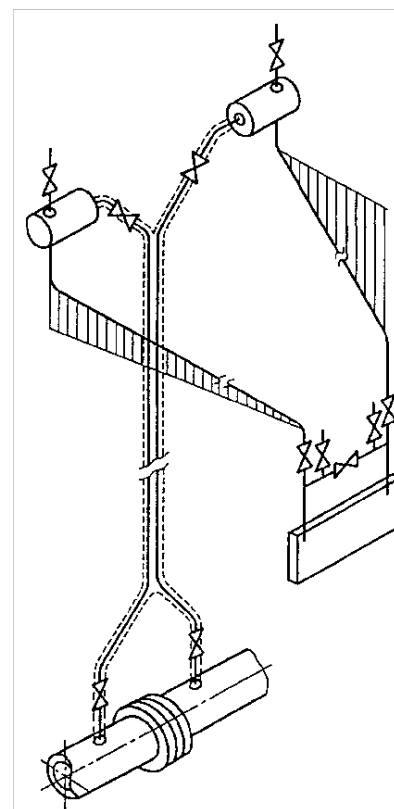
Рис. П.5.6 - Схемы установки измерительного прибора при замере чистого влажного газа в вертикальных трубопроводах



а- дифманометр под трубопроводом;

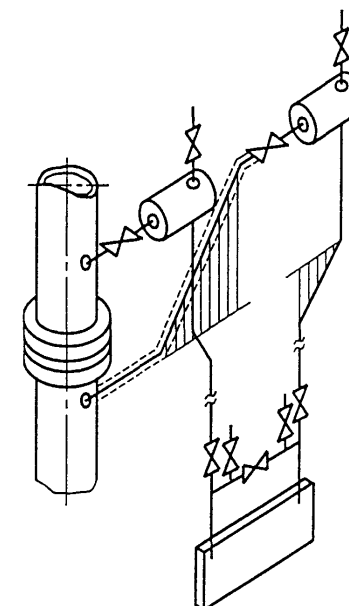


б- дифманометр под трубопроводом (вариант);



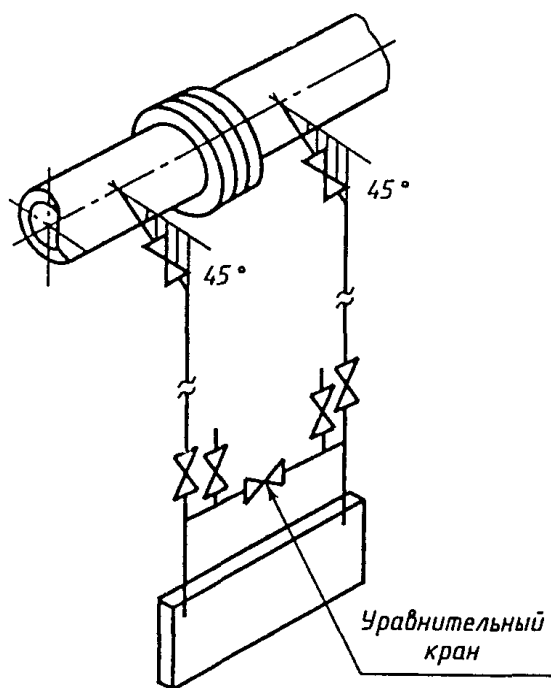
в- дифманометр над трубопроводом

Одинаковый наклон соединительных трубок

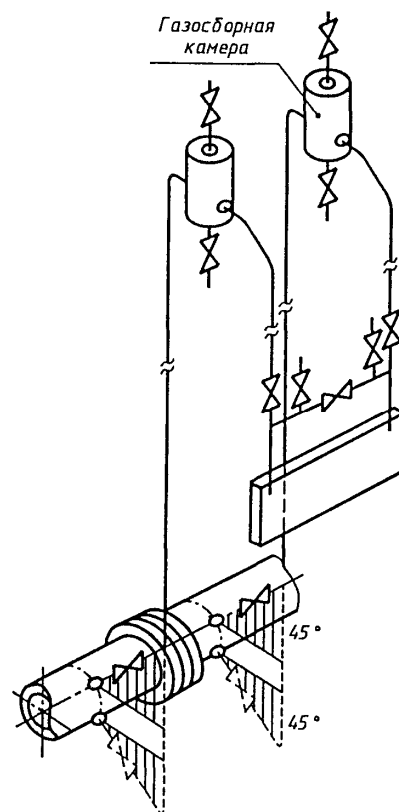


г- дифманометр ниже точек отбора давления; (вертикальный трубопровод)

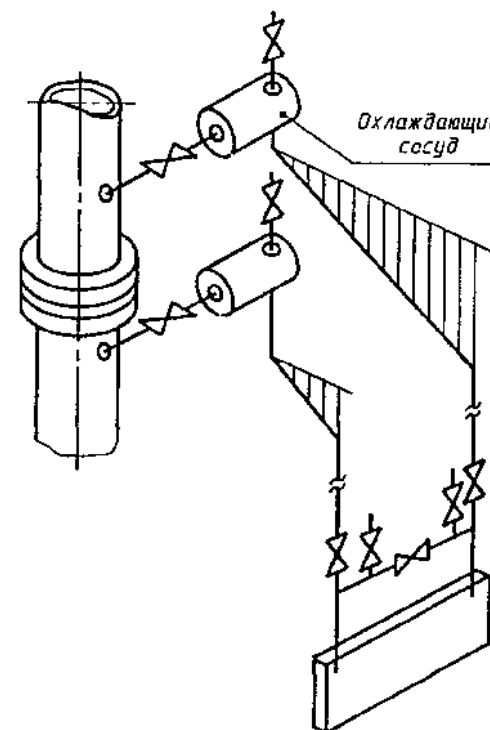
Рис. П.5.7 - Схемы установки измерительного прибора при замера водяного пара и конденсирующегося газа



а - дифманометр под трубопроводом
(холодная жидкость);



б - дифманометр над трубопроводом
(холодная жидкость);



в - вертикальный трубопровод
(горячая жидкость);

Рис. П.5.8 - Схемы установки измерительного прибора при замера жидких сред

Рекомендуемая литература

1. **Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д, Чистяков В.С.** Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1984.–232 с.
2. **Государственная** система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП).Под ред. Кавалерова Г.И. - М.: ЦНИИТЭИ, 1981. – 392 с.
3. **Кремлевский П.П.** Расходомеры и счетчики количества. - Л.: Машиностроение, 1975. – 776 с.
4. **Орнатский П.П.** Автоматические измерения и приборы: Учебник для вузов. – К.: Вища шк., 1980. – 560 с.
5. **Правила** измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами РД 50-213-80. - М.: Изд-во стандартов, 1982.–320 с.
6. **Преображенский В.П.** Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. - М.: Энергия, 1978. – 704 с.
7. **Промышленные** приборы и средства автоматизации: Справочник / Под ред. Черенкова В.В. - Л.: Машиностроение, 1987. – 847 с.
8. **Нубарян С.М.** Контрольно-измерительные приборы в теплотехнических измерениях: Курс лекций. – Харьков: ХНАГХ, 2006. – 283 с.
9. **Расчет** и конструирование расходомеров. Под ред. П.П. Кремлевского. – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.
10. **Нубарян С.М., Нубарян А.С.** Тепловой неконтактный расходомер газа. Труды 27-й Международной научно-практической конференции «Коммерческий учет энергоносителей» – СПб: Борей-Арт, 2005, с.145-153.
11. **З. Кабза.** Математическое моделирование расходомеров с сужающими устройствами/ Пер. с польск. под ред. П.П. Кремлевского. – Л.: Машиностроение, 1981. – 115 с.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	5
1.1. Требования, предъявляемые к приборам коммерческого учета.....	7
1.2. Классификация средств измерения расхода.....	9
2. СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА И КОЛИЧЕСТВА ВЕЩЕСТВА.....	12
2.1. Измерение скоростей и расходов напорными трубками.....	12
2.1.1. Общие сведения о методе измерения скоростей потока.....	12
2.1.2. Устройство напорных трубок.....	13
2.2. Расходомеры постоянного перепада давления.....	15
2.2.1. Устройство ротаметров.....	17
2.2.2. Краткие сведения из теории ротаметров.....	19
2.3. Скоростные расходомеры и счетчики количества.....	22
2.3.1. Тахометрические расходомеры.....	22
2.3.2. Электромагнитные расходомеры.....	29
2.3.3. Расходомер с поворотным крылом.....	32
2.3.4. Ультразвуковые расходомеры.....	34
2.4. Объемные счетчики количества вещества.....	38
2.4.1. Мембранные счетчики газа.....	39
2.4.2. Ротационные счетчики газа.....	42
2.5. Массовые расходомеры.....	44
2.5.1 Вихревые расходомеры.....	44
2.5.2. Кориолисовые расходомеры.....	48
2.5.3. Тепловые расходомеры.....	51
2.5.4. Щелевой расходомер.....	56
3. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ ПРИ ПОМОЩИ СУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ.....	60

3.1. Общие сведения.....	60
3.2. Уравнения расхода.....	61
3.3. Основные требования к сужающим устройствам.....	68
3.4. Определение коэффициента расхода сужающих устройств.....	70
3.4.1. Диафрагмы с угловым способом отбора перепада давления.....	70
3.4.2. Диафрагмы с фланцевым способом отбора перепада давления.....	72
3.4.3. Стандартные сопла и сопла Вентури.....	73
3.4.4. Трубы Вентури.....	73
3.5. Определение основных параметров потоков измеряемых сред.....	75
3.5.1. Давление и температура.....	76
3.5.2. Измерение плотности.....	79
3.5.3. Определение числа Рейнольдса и вязкости потоков.....	83
3.5.4. Коэффициенты расширения и сжимаемости газа.....	85
4. РАСЧЕТ СУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ИХ УСТАНОВКА.....	89
4.1. Методика расчета сужающих устройств.....	89
4.2. Требования к измерительному трубопроводу.....	94
4.3. Схемы измерения расходов сужающими устройствами.....	99
4.4. Погрешности измерения расхода.....	105
5. КОММЕРЧЕСКИЙ УЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ.....	110
5.1. Общие сведения.....	110
5.2. Системы учета тепловой энергии.....	111
5.2.1. Учет тепловой энергии и теплоносителя в источнике теплоты.....	112
5.2.2. Учет тепловой энергии теплоносителя у потребителя теплоты.....	116
5.2.3. Основные требования к приборам учета тепловой энергии.....	121
5.3. Приборы учета тепловой энергии.....	123
Приложения 1-5.....	133
Рекомендуемая литература.....	150

Навчальне видання

Нубарян Сергій Манукович

Засоби комерційного обліку енергоносіїв

Курс лекцій

(для студентів усіх форм навчання і слухачів другої вищої освіти за
напрямом підготовки 0921 (6.0060101) «Будівництво», спеціальності 7.092108
(7.06010107), 8.092108 (8.06010107) «Теплогазопостачання і вентиляція»)

(Рос. мовою)

Відповідальний за випуск *І. І. Капцов*

Редактор *М. З. Аляб'єв*

План 2009, поз. 226 Л

Підп. до друку 30.06.09
Друк на ризографі
Зам. №

Формат 60×84 1/16
Ум. друк. арк. 6,3
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:
Харківська національна академія міського господарства
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 731 від 19.12.2001