



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный  
технический университет**

---

---

**Кафедра «Кораблестроение и гидравлика»**

**В. В. Кулебякин**

# **МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ**

**Учебно-методическое пособие**

**Минск  
БНТУ  
2017**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Кораблестроение и гидравлика»

В. В. Кулебякин

# МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности  
1-43 01 04 «Тепловые электрические станции»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по образованию в области энергетики*

Минск  
БНТУ  
2017

УДК 681.121  
ББК 31.32-5я7  
К 90

Рецензенты:

канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова  
НАН Беларуси» *В.А. Кузьмин*;  
канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова  
НАН Беларуси» *А. В. Суворов*

**Кулебякин, В. В.**

К 90 Методы и приборы для измерения расхода жидкостей и газов : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-43 01 04 «Тепловые электрические станции» / В. В. Кулебякин. – Минск : БНТУ, 2017. – 46 с.  
ISBN 978-985-550-618-9.

Учебно-методическое пособие по методам и приборам для измерения расхода жидкостей и газов составлено для студентов дневной и заочной формы обучения энергетических и строительных специальностей. В основу издания положены материалы различных литературных источников, главным образом – справочника «Расходомеры и счетчики количества» (автор П. П. Кремлевский).

Предназначено для самостоятельной работы студентов при подготовке к лабораторным работам, семинарским занятиям, зачетам и экзаменам.

УДК 681.121  
ББК 31.32-5я7

ISBN 978-985-550-618-9

© Кулебякин В. В., 2017  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2017

## ВВЕДЕНИЕ

Под *расходом* в механике жидкости и газа понимается количество вещества, проходящее через живое сечение потока в единицу времени. Если это количество измеряется в единицах массы, то расход называется *массовым*, в случае использования для измерения количества единиц объема – *объемным*, если же мерой количества вещества являются единицы силы (обычно это силы тяжести), то расход называется *весовым*. Приборы, измеряющие расход вещества, называются *расходомерами*.

Значение расходомеров в современных отраслях промышленности, энергетике, транспорте, сельском и коммунальном хозяйстве трудно переоценить. Без их использования невозможно обеспечить оптимальность технологических режимов в промышленных процессах, создать автоматизированные системы контроля и управления ими, а также системы учета различных жидких и газообразных продуктов. В настоящее время в связи с повсеместным развитием и внедрением энерго- и ресурсосберегающих технологий роль и значение расходомеров жидкости, газа и пара еще более возрастают.

Терминологически следует различать расходомеры и счетчики количества вещества. Если расходомер, вообще говоря, дает информацию о количестве вещества в единицу времени (например, килограмм в секунду), то счетчик показывает общее количество вещества, прошедшее через поперечное сечение потока за период с начала процесса и до его окончания. Иногда эти функции совмещаются, в этом случае прибор называется расходомером со счетчиком (или счетчик-расходомер).

Устройство, непосредственно воспринимающее измеряемый расход и преобразующее его в другую физическую величину, удобную для измерений, называется *преобразователем расхода*. Соответственно, расходомеры, использующие различные физические механизмы и принципы действия, можно разделить на несколько групп:

- приборы, использующие гидродинамические методы (расходомеры переменного перепада давления, переменного уровня, расходомеры обтекания, вихревые и т. д.);
- приборы с движущимся рабочим органом (тахометрические, вибрационные, с автоколеблющимся телом);

– приборы, использующие различные физические явления (тепловые, электромагнитные, акустические, оптические, ядерно-магнитные, ионизационные);

– приборы, основанные на применении особых методов (метод меток, корреляционные и концентрационные методы).

Указанные разновидности расходомеров и их преобразователей приведены в ГОСТ 15528–86.

## 1. РАСХОДОМЕРЫ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Принцип действия расходомеров переменного перепада давления заключается в использовании зависимости расхода жидкости или газа, протекающих через устройство, установленное в трубопроводе, от перепада давления между определенными поперечными сечениями устройства. В состав расходомеров этого типа входят:

- преобразователь расхода, создающий перепад давления;
- дифференциальный манометр, измеряющий этот перепад;
- соединительные трубки для подключения преобразователя к дифманометру.

В настоящее время к указанным элементам, как правило, добавляется еще вторичный преобразователь, в котором перемещение подвижного элемента дифманометра трансформируется в электрический сигнал, что создает возможность его цифровой обработки и передачи на системы обработки информации. В зависимости от конструктивного исполнения преобразователя расхода рассматриваемые расходомеры подразделяются на несколько групп.

*Расходомеры с сужающими устройствами* – важнейший и наиболее распространенный в практике тип расходомеров. Принцип их действия основан на зависимости перепада давления, создаваемого в сужающем устройстве, от расхода жидкости или газа, проходящего через него. Происходящие при этом физические процессы обусловлены преобразованием части потенциальной энергии потока в кинетическую энергию. Разновидности сужающих устройств, нашедших широкое применение в промышленности и энергетике, приведены на рис. 1.1.

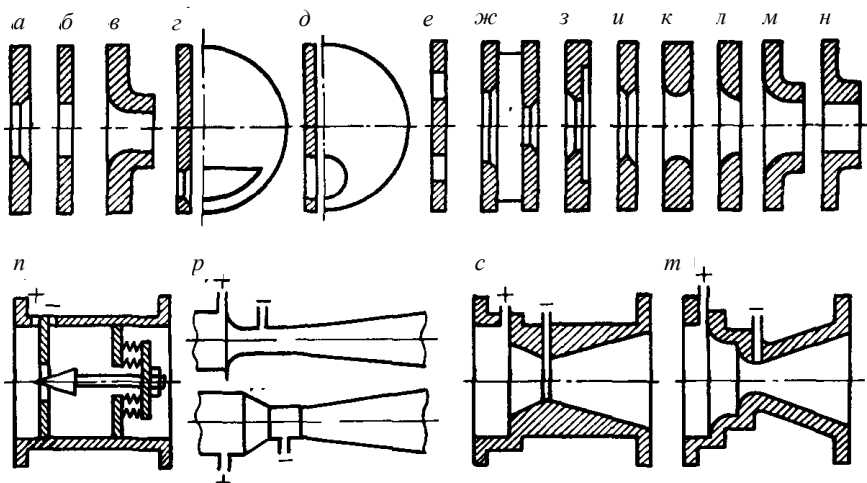


Рис. 1.1. Варианты конструктивного исполнения сужающих устройств:  
*а, б* – стандартные диафрагмы (мерные шайбы); *в* – стандартное сопло;  
*г, д, е* – диафрагмы для измерения расхода загрязненных веществ: сегментная, эксцентричная и кольцевая; сужающие устройства для сред с большой вязкостью;  
*ж* – двойная диафрагма; *з* – диафрагма с входным конусом; *и* – диафрагма с двойным конусом; *к* – полукруговое сопло; *л* – сопло в четверть круга;  
*м* – комбинированное сопло; *н* – цилиндрическое сопло; *п* – диафрагма с переменной площадью отверстия, автоматически компенсирующая влияние изменения давления и температуры среды; *р* – труба (сопло) Вентури;  
*с* – труба Дала; *т* – труба Вентури с двойным сужением

**Расходомеры с гидравлическим сопротивлением (рис. 1.2)** – устройства, принцип действия которых основан на зависимости перепада давления, вызываемого гидравлическим сопротивлением, от расхода текучей среды. Режим течения в таких устройствах, как правило, ламинарный, и применяются они для измерения малых расходов. В этом случае, как известно, перепад давления пропорционален расходу.

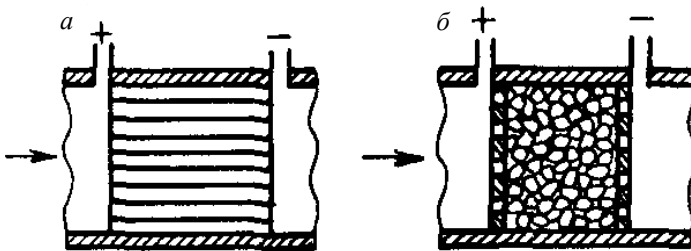


Рис. 1.2. Конструкции расходомеров с гидравлическим сопротивлением:  
*a* – устройство, образованное несколькими капиллярными трубками;  
*б* – устройство с засыпкой

**Центробежные расходомеры (рис. 1.3)** – устройства, принцип действия которых основан на зависимости перепада давления, образующегося в закруглении трубопровода в результате действия на частицы текучей среды центробежной силы.

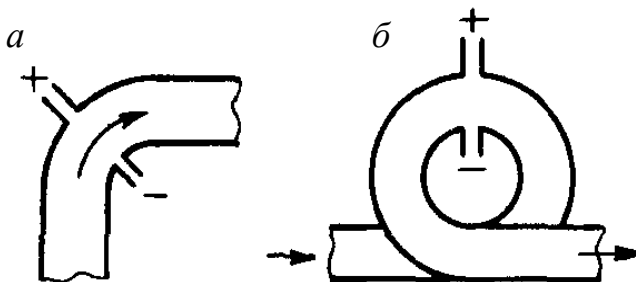


Рис. 1.3. Примерные схемы центробежных расходомеров:  
*a* – поворот потока (колено); *б* – участок трубы в форме кольца

**Расходомеры с напорным устройством (рис. 1.4)** – приборы, в которых перепад давления создается в результате местного перехода кинетической энергии потока в потенциальную, но при этом он зависит от расхода. Преобразователями расхода в таких устройствах могут быть, например, трубка Пито или осредняющие (интегрирующие) напорные трубки с различной формой и расположением в потоке. Обычно усреднение полного давления, воспринимаемого такими трубками, выполняется по диаметру или радиусу трубы, иногда – по кольцевой площади.

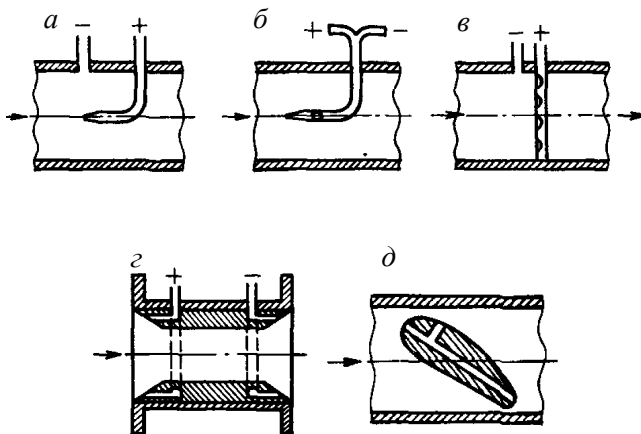


Рис. 1.4. Варианты расходомеров с напорным устройством:  
*a* – трубка полного напора и трубка для отбора статического давления;  
*б* – трубка (дифференциальная) Пито–Прандтля; *в* – осредняющая (интегральная)  
 по диаметру трубка полного давления; *г* – расходомер с кольцевой вставкой  
 для усреднения давления; *д* – напорный поворотный профиль с двумя  
 отверстиями, различным образом ориентированными к потоку

**Расходомеры с напорным усилителем (рис. 1.5)** сочетают в преобразователе расхода напорное и сужающее устройство. Указанное сочетание повышает чувствительность приборов без применения специальных усилительных устройств. Поэтому расходомеры этого типа применяются при небольших скоростях газовых потоков, когда перепад давления в напорных трубках недостаточен.

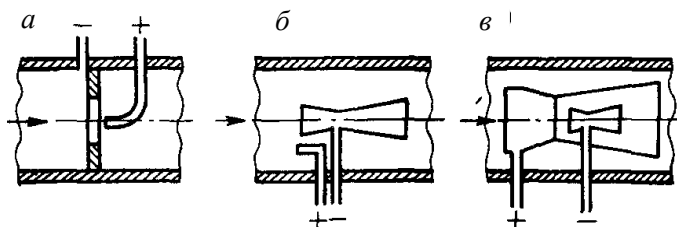


Рис. 1.5. Схемы расходомеров с напорным усилителем:  
*a* – сочетание диафрагмы и трубки полного напора; *б* – комбинация трубки  
 полного напора и сопла Вентури; *в* – двойная труба Вентури



**Расходомеры ударно-струйные** используют зависимость от расхода перепада давления, возникающего при ударе струи о преграду. Конструкция такого расходомера приведена на рис. 1.6. Как правило, они используются для измерений малых расходов жидкостей и газов.

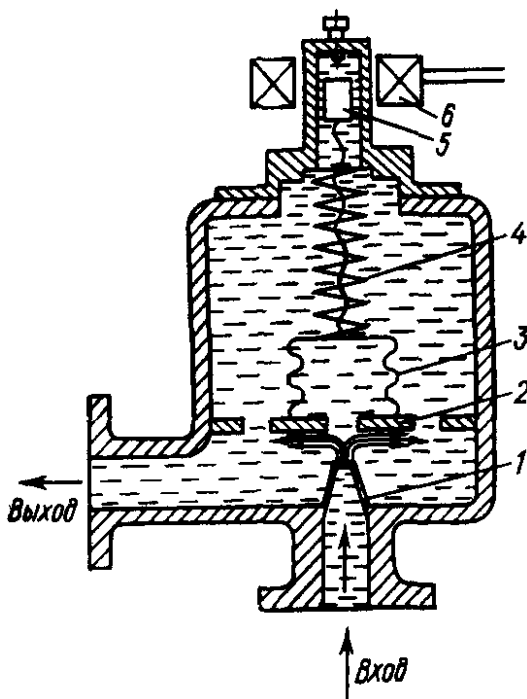


Рис. 1.6. Ударно-струйный расходомер

Струя, вытекающая из сужения отверстия *1* входной трубки, ударяясь о перегородку *2*, имеющую центральное отверстие, создает ударное давление  $p_1$  на дно сильфона, снаружи которого действует меньшее по величине давление  $p_2$ , равное давлению уходящей жидкости в выходной трубке. Перемещение дна сильфона под действием перепада давлений вызывает перемещение плунжера *5* внутри магнитной трубки, снаружи которой находится катушка индуктивности *6*, с помощью которой фиксируется перемещение плунжера *5*.

## Зависимость перепада давления на сужающем устройстве от расхода через него

Рассмотрим движение потока текучей среды через наиболее распространенный тип сужающего устройства – диафрагму. Как уже указывалось, диафрагма представляет собой тонкий диск с расположенным на его оси круглым отверстием. Ввиду внешнего сходства с соответствующей крепежной деталью диафрагму зачастую называют мерной шайбой. Диафрагма устанавливается в трубопровод так, чтобы ось ее отверстия как можно точнее совпадала с осью трубы.

На рис. 1.7 схематически показано обтекание потоком текучей среды отверстия диафрагмы и распределение давления и средней скорости вдоль трубы.

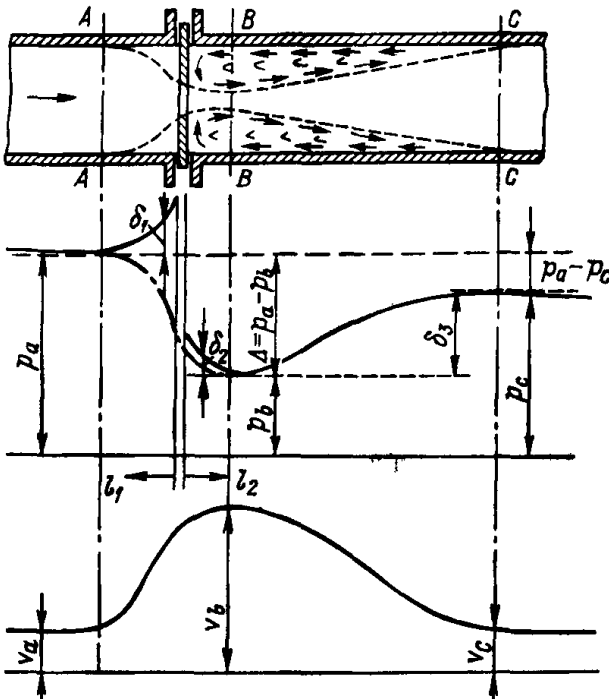


Рис. 1.7. Обтекание потоком текучей среды отверстия диафрагмы и распределение давления и средней скорости вдоль трубы

В сечении  $A-A$  начинается сужение струи и, соответственно, возрастание скорости потока. Максимального значения скорость достигает в месте наибольшего сжатия струи за диафрагмой в сечении  $B-B$ , расположенном на расстоянии примерно  $0,5 D$ , где  $D$  – диаметр трубы. При этом давление уменьшается от начального  $p_a$  до давления в сжатом (наименьшем) сечении струи  $p_b$ . В последующем поток постепенно расширяется и в сечении  $C-C$  вновь достигает стенок трубы. Скорость его при этом несколько уменьшается, а давление – возрастает.

Если жидкость несжимаема, то в сечении  $C-C$  ее средняя скорость будет равна начальной скорости:  $v_a = v_c$ , что следует из закона сохранения вещества. Однако давление  $p_c$  будет меньше начального  $p_a$  вследствие потери энергии при прохождении потоком зон вихреобразования до и за отверстием диафрагмы. Остаточная потеря давления ( $p_a - p_c$ ) на диафрагмах составляет 40–90 % от перепада давления ( $p_a - p_b$ ), возрастая с уменьшением относительного диаметра диафрагмы

$$n = d/D.$$

Запишем уравнение Бернулли и уравнение неразрывности для потока текучей среды, проходящей через диафрагму:

$$\frac{p_a}{\rho} + \frac{\alpha_a v_a^2}{2} = \frac{p_b}{\rho} + \frac{\alpha_b v_b^2}{2} + \zeta \frac{v_b^2}{2};$$

$$G = \rho F_a v_a = \rho F_b v_b.$$

Здесь  $\alpha_a$  и  $\alpha_b$  – коэффициенты Кориолиса, учитывающие неравномерность распределения скоростей;

$\zeta$  – коэффициент потерь на местном сопротивлении (участке от сечения  $A-A$  до  $B-B$ );

$F_a$  и  $F_b$  – площадь сечения потока в  $A-A$  и  $B-B$  соответственно.

Отношение площади струи  $F_b$  к площади отверстия диафрагмы  $F_o$  называется коэффициентом сжатия струи  $\epsilon$ . Исходя из этого определения, получим

$$F_b = \varepsilon F_o,$$

и, следовательно,

$$v_a = v_b \varepsilon \left( \frac{F_o}{F_a} \right) = v_b \varepsilon \left( \frac{d}{D} \right)^2.$$

Отношение площадей  $F_o/F_a$  называется *относительной площадью сужающего устройства* (ранее его называли модулем) и обозначается буквой  $m$ .

Таким образом:

$$m = \frac{F_o}{F_a} = \left( \frac{d}{D} \right)^2$$

и, следовательно,

$$v_a = v_b \varepsilon m.$$

Подставляя это выражение для скорости  $v_a$  в уравнение Бернулли и решив его относительно скорости, получим

$$v_b = \sqrt{\frac{\Psi}{\zeta + \alpha_b - \alpha_a \varepsilon^2 m^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}.$$

Здесь введен коэффициент

$$\Psi = \frac{p_a - p_b}{p_1 - p_2},$$

с помощью которого учитывается, что в общем случае точки отбора давления  $p_1$  и  $p_2$  могут не совпадать с сечениями  $A-A$  и  $B-B$ . Так, часто применяется метод отбора давлений в углах, образованных входной и выходной плоскостями диафрагмы со стенками трубы

(так называемый угловой метод отбора). Если отбор давлений производится в сечениях  $A-A$  и  $B-B$ , то  $\psi = 1$ .

Для массового расхода с учетом вышесказанного получим

$$Q = \mu F_0 \sqrt{2g(p_1 - p_2)}, \quad (1.1)$$

где  $\mu = \varepsilon \frac{\sqrt{\psi}}{\sqrt{\zeta + \alpha_b - \alpha_a \varepsilon^2 m^2}}$  – коэффициент расхода сужающего устройства.

Таким образом, между расходом и перепадом давления в сужающих устройствах имеется квадратическая зависимость. Это существенный недостаток, поскольку уменьшается динамический диапазон измерений расходомера. Например, при расходе  $Q = 25\% Q_{\max}$  измеряемый перепад составляет лишь около 6% от максимального. Следовательно, точные измерения таким расходомером можно проводить только в пределах 30–100% от  $Q_{\max}$ .

Вследствие влияния погрешностей ряда величин, входящих в формулу для расхода, предельная приведенная погрешность расходомеров с сужающими устройствами обычно не меньше 2%.

Несмотря на вышесказанное, расходомеры этого типа получили весьма широкое распространение благодаря трем важным достоинствам:

1. **Универсальность применения.** Эти расходомеры можно использовать для измерений в любых однофазных (а нередко – и в двухфазных) текучих средах. При этом за счет изменения конструкции и размеров диапазон изменения давлений, температур и расходов может быть весьма велик.

2. **Удобство и простота массового производства.** Самые сложные узлы прибора – дифманометр и вторичный прибор – не зависят от природы среды и значений расхода, их можно изготавливать независимо, крупными сериями. Преобразователь же расхода прост по конструкции и не требует сложного оборудования для изготовления.

3. **Отсутствие необходимости в образцовых установках для градуировки** и поверки в случае применения нормализованных сужающих устройств в трубах диаметром не менее 12,5–50 мм.

## 2. РАСХОДОМЕРЫ ПЕРЕМЕННОГО УРОВНЯ

*Расходомерами переменного уровня* называются приборы, принцип действия которых основан на зависимости между расходом и высотой уровня в сосуде, в который жидкость непрерывно поступает и из которого она вытекает через отверстие в дне или в боковой стенке. Преобразователем расхода в этом случае является сосуд с отверстием для истечения. Уровень жидкости в нем измеряется непосредственно или косвенным образом.

Расходомеры могут быть с полностью или с частично затопленным отверстием истечения. В первом случае отверстие делается, как правило, круглым и располагается в нижней части сосуда или в его дне. Такой расходомер можно рассматривать как определенный тип расходомеров переменного перепада давления. Во втором варианте отверстие располагается на боковой стенке сосуда и может иметь форму прямоугольной щели, треугольника, симметричной трапеции или части круга.

### 2.1. Расходомеры с затопленным отверстием истечения

В качестве отверстия истечения в расходомерах с затопленным отверстием истечения обычно используется диафрагма. Стандартные сопла не применяются в качестве отверстий истечения, поскольку в них возможен отрыв струи от стенки при малых числах  $Re$  под действием сил тяжести и, как следствие, непостоянство коэффициента расхода.

Схема установки с таким расходомером приведена на рис. 2.1.

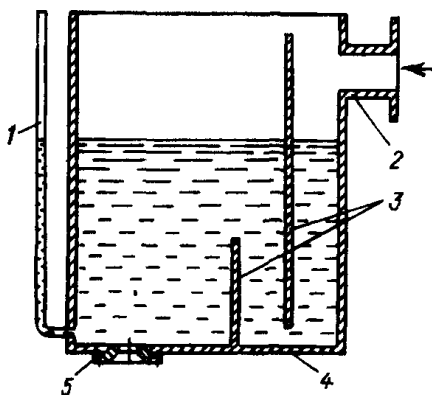


Рис. 2.1. Установка с расходомером с затопленным отверстием истечения

Для устранения возмущений, создаваемых жидкостью, поступающей по трубе 2, служат перфорированные перегородки 3. Уровень жидкости измеряется трубкой 1 со шкалой. В отверстии истечения установлена нормализованная диафрагма 5 таким образом, что ее торцевая плоскость совпадает с плоскостью дна 4. Для исключения влияния боковых стенок расстояние от ее оси до ближайшей стенки должно быть не менее трех диаметров отверстия диафрагмы.

Перепад давления на диафрагме

$$\Delta p = h\gamma,$$

где  $h$  – высота уровня жидкости в баке.

Подставляя это выражение в выведенную ранее формулу (1.1) для объемного расхода через сужающее устройство, получим

$$Q = \mu F_o \sqrt{2gh},$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода.

Таким образом, как уже неоднократно отмечалось, объемный расход не зависит от плотности жидкости и определяется высотой ее уровня. Это же уравнение справедливо для диафрагмы, установленной в боковой стенке сосуда.

## 2.2. Щелевые расходомеры с неподвижным сосудом

Для измерения расхода воды в открытых каналах весьма широко используются **водосливы**, которые представляют собой разновидность щелевых преобразователей расхода. Расход в этом приборе определяется по высоте уровня жидкости над нижней кромкой отверстия истечения. Форма отверстия, в принципе, может быть произвольной и выбирается из соображений удобства шкалы измерителя. Рассмотрим, например, истечение жидкости из отверстия произвольной формы, изображенного на рис. 2.2.

Объемный расход  $dQ$  через элементарную площадку шириной  $x$  и высотой  $dy$ , расположенную на высоте  $y$  от нижней кромки отверстия, находим по формуле

$$dQ = \mu x dy \sqrt{2g(h-y)}.$$

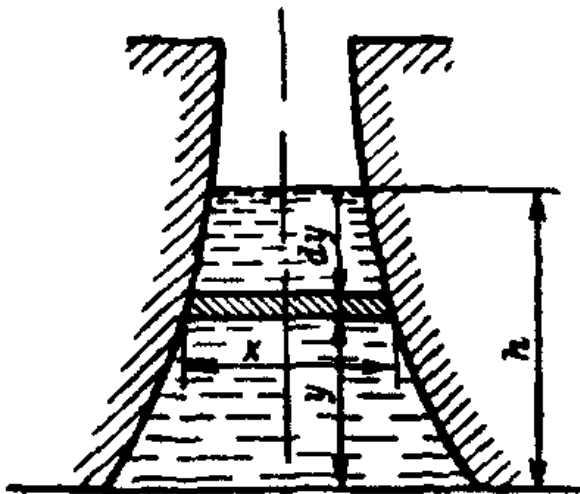


Рис. 2.2. Истечение жидкости из отверстия произвольной формы

Полный расход жидкости через отверстие истечения определится как

$$Q = \sqrt{2g} \int_0^h \mu x \sqrt{h-y} \, dy.$$

Простейшей формой отверстия истечения является прямоугольная форма шириной  $b$  (рис. 2.3, а). Интегрируя полученное выражение для расхода, в этом случае придем к соотношению

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2gh}^{3/2},$$

т. е. шкала у такого прибора неравномерная, сужающаяся от 0 до  $Q_{\max}$ , и это его недостаток.



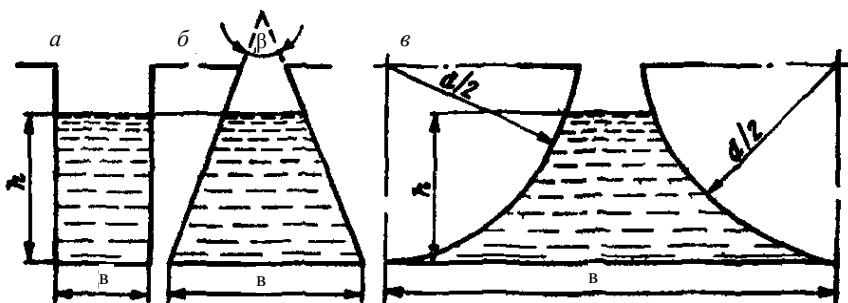


Рис. 2.3. Некоторые возможные формы отверстий истечения

Более равномерной получается шкала у отверстия, имеющего форму равнобедренной трапеции, расширяющейся книзу (рис. 2.3, б). Уравнение расхода в этом случае имеет вид

$$Q = \frac{2}{15} \mu \sqrt{2gh}^{3/2} \left( 5b - 4htg \frac{\beta}{2} \right),$$

и при угле  $\beta = 50^\circ$  достигается хорошая пропорциональность между  $Q$  и  $h$ .

Еще лучший результат достигается для отверстия, представленного на рис. 2.3, в, каждая из боковых стенок которого образована четвертью окружности диаметром  $d$ . Для такой конструкции получается практически линейная шкала в пределах от 10 до 100 % расхода.

Можно определить форму отверстия, для которого шкала прибора будет линейной. Она получается из решения уравнения Абеля и дает связь между координатами  $x$  и  $y$  в виде

$$x = c\sqrt{y},$$

где  $c = \frac{\sqrt{2k}}{\mu\sqrt{g}}$ , а коэффициент  $k = Q_{\max}/h_{\max}$  есть постоянная, задаваемая из начальных условий.

Как следует из уравнения профиля, при очень малых  $y$  ширина отверстия  $x$  стремится к бесконечности. Поэтому на практике такую форму профиля осуществить нельзя и небольшую нижнюю часть отверстия делают прямоугольной.

### 2.3. Расходомеры переменного уровня с подвижным сосудом

Щелевые расходомеры с подвижным сосудом, непрерывно заполняемым жидкостью, отличаются от рассмотренных в п. 2.2 тем, что измеряется масса сосуда с жидкостью, а поскольку эта масса зависит от уровня жидкости в сосуде, то тем самым определяется ее расход. Причем, выбирая надлежащим образом форму сосуда и отверстия истечения, можно получить линейную зависимость между массой жидкости в сосуде и расходом.

На рис. 2.4 приведены возможные разновидности форм сосудов и отверстий истечения расходомеров переменного уровня с подвижным сосудом.

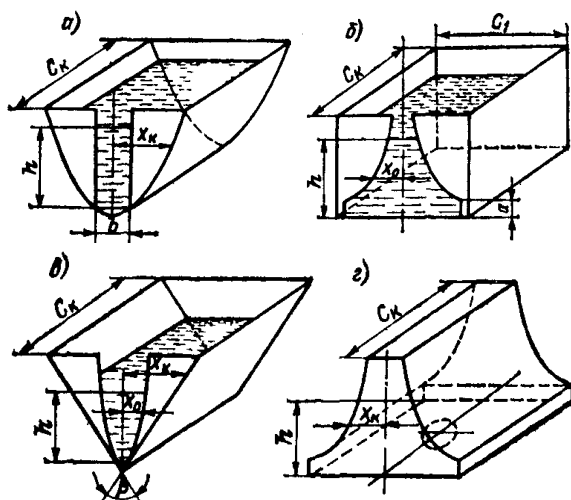


Рис. 2.4. Примерная форма сосудов и отверстий истечения расходомеров

Первые три имеют щелевые отверстия в одной из боковых стенок (рис. 2.4, а–в). У последнего сосуда (рис. 2.4, г) круглое отверстие истечения расположено в дне. Для обеспечения пропорциональности между расходом и массой жидкости поперечное сечение первого сосуда представляет собой параболу, а отверстие имеет прямоугольную форму. У второго сосуда, наоборот, форма прямоугольная, но профиль отверстия имеет оптимальную конфигурацию (см. п. 2.2).

### 3. РАСХОДОМЕРЫ ОБТЕКАНИЯ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

*Расходомерами обтекания* называются измерители, в которых чувствительный элемент, воспринимая динамическое давление потока, перемещается или сила, действующая на него со стороны потока, каким-либо способом компенсируется, а величина его перемещения или действующей силы связывается с расходом.

Обычно расходомеры обтекания делятся на три группы:

*1) расходомеры постоянного перепада давления*, в которых обтекаемое тело перемещается вертикально, а противодействующая сила создается его весом;

*2) расходомеры с изменяющимся перепадом давления*, в которых траектория движения обтекаемого тела может быть не только вертикальной, а противодействующая сила может создаваться упругим элементом;

*3) расходомеры с поворотной лопастью*, в которых противодействующая сила создается не только весом, но и упругим элементом, а также посторонним источником энергии.

Во всех расходомерах обтекания между стенками трубопровода и обтекаемым телом остается небольшое проходное сечение. Поэтому условия обтекания тела существенно отличаются от его обтекания свободным потоком, в частности, возникает довольно значительная разность статических давлений.

#### 3.1. Ротамеры

Ротамер состоит из расширяющейся вверх (конической) трубки, внутри которой перемещается поплавочек. Если трубка стеклянная, на ее поверхность может быть нанесена шкала. Длина трубки может быть от 70 до 600 мм, а ее диаметр – от 1,5 до 100 мм. Использовать ротамеры со стеклянной трубкой можно при температурах до 150 °С и давлениях до 0,5 МПа.

Достоинства ротаметров заключаются в простоте устройства и эксплуатации, наглядности показаний, надежности и удобстве применения для измерения малых расходов различных жидкостей и газов (в том числе – агрессивных), в значительном динамическом диапазоне и достаточно равномерной шкале.

В ротаметре так же, как в преобразователе расхода с сужающим устройством, можно выделить три сечения (рис. 3.1):

1-1, где начинает сказываться возмущающее действие поплавка на поток;

2-2 – узкое кольцевое сечение потока с максимальной скоростью течения;

3-3, в котором заканчивается возмущающее действие поплавка на поток.

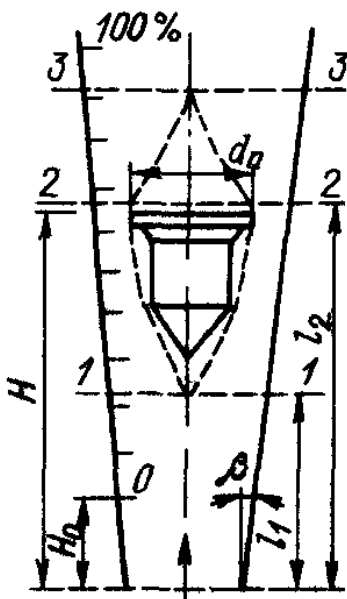


Рис. 3.1. Ротаметр

На поплавок (см. рис. 3.1) снизу вверх действуют силы давления, возникающие из-за разности статического давления на носовой и кормовой оконечностях поплавка при его обтекании, и сила его гидродинамического сопротивления.

В состоянии динамического равновесия (когда поплавок перестает двигаться) эти силы уравновешиваются весом поплавка (с учетом силы Архимеда), направленным сверху вниз.

Таким образом, условие динамического равновесия поплавка можно записать в виде

$$(p_1 - p_2)f + C_d f \frac{\rho v^2}{2} = V_{\text{п}} (\rho_{\text{п}} - \rho) g,$$

где  $p_1 - p_2$  – разность давлений в сечениях 1 и 2;

$f$  – площадь миделева (наибольшего поперечного) сечения поплавка;

$C_d$  – коэффициент сопротивления поплавка;

$\rho$  – плотность жидкости;

$v$  – скорость жидкости в сечении 1–1;

$V_{\text{п}}$  – его объем;

$\rho_{\text{п}}$  – плотность материала поплавка.

Однако получить расчетным путем характеристику ротаметра, т. е. связь между положением поплавка и расходом, практически не удастся вследствие комплексного влияния на нее ряда факторов, которые не вполне поддаются расчету. В этой связи каждый ротаметр на заводе-изготовителе градуируется на воде или на воздухе. Применять же ротаметры приходится для измерений в различных средах, т. е. возникает необходимость пересчета заводской градуировки. С этой целью можно ввести пересчетный множитель  $k$ , умножая на который значение расхода  $Q_{\text{г}}$  по градуировочной зависимости, получим величину расхода для исследуемой среды:

$$k = \frac{\mu [\rho_{\text{г}} (\rho_{\text{п}} - \rho)]^{0,5}}{\mu_{\text{г}} [\rho (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{г}})]^{0,5}},$$

где  $\mu$  и  $\mu_{\text{г}}$  – коэффициенты расхода для измеряемой и градуировочной среды, а  $\rho$  с соответствующими индексами – плотность.

Поскольку априори величина коэффициента расхода для измеряемой среды неизвестна, то воспользоваться этой формулой пересчета можно лишь для веществ с близкой вязкостью, полагая, что в этом случае  $\mu \sim \mu_{\text{г}}$ .

Если же  $\rho_{\text{п}}$  (что обычно бывает для газов), то формула еще более упрощается:

$$k = \left( \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho} \right)^{0,5}.$$

Поплавки для ротаметров (рис. 3.2) изготавливаются из различных материалов: нержавеющей стали, титана, алюминиевых сплавов, фторопласта и различных пластмасс в зависимости от диапазона измерений и агрессивности измеряемой среды. Иногда для снижения веса поплавки выполняются пустотелыми.

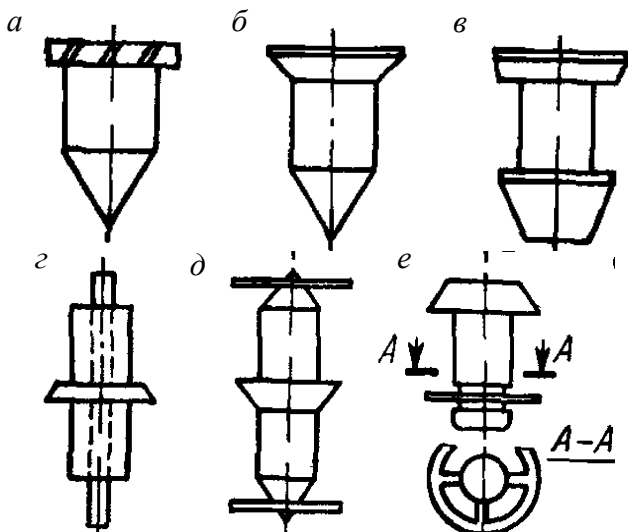


Рис. 3.2. Примерные формы поплавков ротаметров

Второй основной элемент ротаметра – измерительная коническая трубка (с конусностью 0,001–0,01), обычно изготавливаемая из химически стойкого или термостойкого боросиликатного стекла. Чувствительность прибора возрастает с уменьшением угла конусности трубки.

### 3.2. Поплавковые расходомеры

Поплавковые расходомеры входят в группу расходомеров постоянного перепада давления. По принципу действия они похожи на ротаметры, поэтому рассмотренные выше теоретические положения справедливы и для них. Однако от ротаметров эти приборы отличаются конструктивно: в них отсутствует стеклянная коническая трубка, а также внешняя форма поплавка иная и ход его небольшой.

Пара, приведенная на рис. 3.3, *а*, состоит из грибообразного поплавка, перемещающегося в коническом канале и применяется, как правило, для измерения малых расходов (до  $0,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) воды.

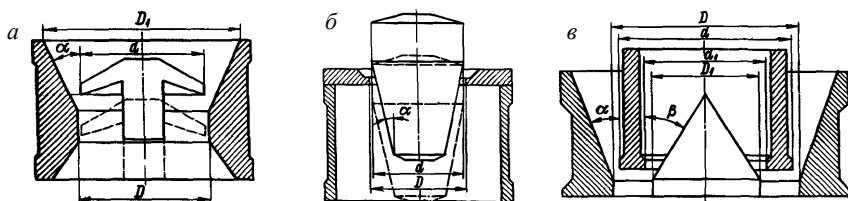


Рис. 3.3. Формы поплавковых пар

Пара на рис. 3.3, *б* представляет собой конический поплавок, перемещающийся в круглом отверстии, причем угол конусности поплавка в различных модификациях может меняться, и с его возрастанием увеличивается верхний предел измерений расходомера.

Пара на рис. 3.3, *в* имеет кольцевой цилиндрический поплавок, перемещающийся в отверстии, образованном центральным конусом и наружной конической расточкой (с другим углом конусности).

### 3.3. Поршневые расходомеры

В поршневых или золотниковых расходомерах роль поплавка выполняет поршень или другой подвижный элемент, перемещающийся во втулке с окнами специальной формы. Измеряемая среда поступает под поршень и, приподнимая его, выходит через окно или прорезь во втулке. Давление над поршнем одинаково с давлением в выходном штуцере, поэтому чем больше расход, тем выше поднимается поршень, открывая все большую часть отверстия во втулке. Выбирая форму прорези, можно получить различную зависимость между расходом и перемещением поршня.

### 3.4. Расходомеры с изменяющимся перепадом давления

Как в расходомерах постоянного перепада, в приборах измеряющегося перепада имеется поплавок, на который воздействует поток измеряемой среды, и величина его перемещения связана с расходом. Такие расходомеры можно подразделить на поплавково-пружинные, поплавково-архимедовые, с электромагнитным уравновешиванием и шариковые с движением в криволинейной трубке.

Если поплавков соединить с пружиной, то получим поплавково-пружинный расходомер, в котором давление потока должно преодолевать не только вес поплавка, но и упругость пружины. Таким образом появляется возможность повышения верхнего предела измерений, а на различные диапазоны измерения можно переходить просто меняя пружину.

Если поплавков связать с железным сердечником, помещенным в магнитное поле соленоида, то, регулируя электрический ток в его обмотке, можно уравнивать силы динамического воздействия потока. Как правило, подобные расходомеры работают по компенсационной схеме, в которой также задействовано устройство, реагирующее на перемещение поплавка и изменяющее силу тока.

В схеме шарикового расходомера шарик помещается в трубу несколько большего диаметра, изготовленную в форме дуги окружности. При отсутствии движения среды шарик под действием сил тяжести занимает крайнее нижнее положение. После начала течения и по мере увеличения расхода шарик поднимается на некоторую высоту, которая зависит от динамического давления на него потока жидкости. При этом жидкость проходит через сечение серповидной формы, образующееся между поверхностью шарика и стенками трубы.

### **3.5. Расходомеры с поворотной лопастью**

Принцип действия приборов с поворотной лопастью состоит в изменении угла поворота лопасти, на которую воздействует динамическое давление потока. Расход определяется либо по углу ее поворота, либо по величине противодействующей силы в приборах компенсационного типа. По виду противодействующей силы расходомеры подразделяются на приборы с грузовым и пружинным уравниванием, а также компенсационные с пневматическим или электрическим уравниванием.

Достоинствами таких расходомеров являются большой динамический диапазон (до 15–20) и возможность двустороннего действия. Кроме того, они позволяют достаточно просто осуществлять измерения больших расходов жидкостей и газов, имеющих высокую температуру, или агрессивных сред. Динамические характеристики у них также достаточно хорошие.



## 4. ТУРБИННЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

### 4.1. Общая характеристика

*Турбинными* или *тахометрическими* называются расходомеры и счетчики, имеющие вращающийся элемент, скорость вращения которого зависит от расхода. Измеряя скорость вращения в реальном времени, имеем расходомер, а измеряя общее количество оборотов (накопленное за определенный интервал времени), получаем счетчик количества (объема или массы) прошедшего через него вещества. Широкое распространение такие счетчики получили в коммунальном хозяйстве и энергетике, поскольку для регистрации количества с его помощью нужно лишь вал турбинки соединить через зубчатый редуктор со счетным механизмом. Для реализации же расходомера скорость вращения следует преобразовать в сигнал, пропорциональный расходу, поэтому необходим двухступенчатый преобразователь, в котором турбинка вращается со скоростью, пропорциональной расходу, а скорость ее вращения воспринимается прибором-тахометром. Поэтому тахометрические расходомеры появились позже счетчиков и не получили столь широкого распространения. Достоинства указанных приборов – в их относительном быстродействии, точности измерений и большим динамическом диапазоне.

Турбинные расходомеры могут применяться для труб диаметром от 4 до 750 мм, давлений до 250 МПа и температур от –240 до +700 °С. Основной недостаток турбинных расходомеров – износ опор, в которых устанавливается ось турбинки (и собственно оси), поэтому они непригодны для сред, содержащих механические примеси. Кроме того, с увеличением вязкости может изменяться их характеристика, в частности, уменьшаться ее линейная часть. В то же время смазывающая способность измеряемых сред положительно сказывается на работе таких расходомеров.

Турбинные преобразователи расхода могут быть с аксиальной или тангенциальной турбинкой (рис. 4.1). В первом случае лопасти расположены по винтовой линии, а ось совпадает с осью потока. Во втором случае ось вращения турбинки перпендикулярна к потоку, а лопасти – прямые и расположены радиально по отношению к оси.

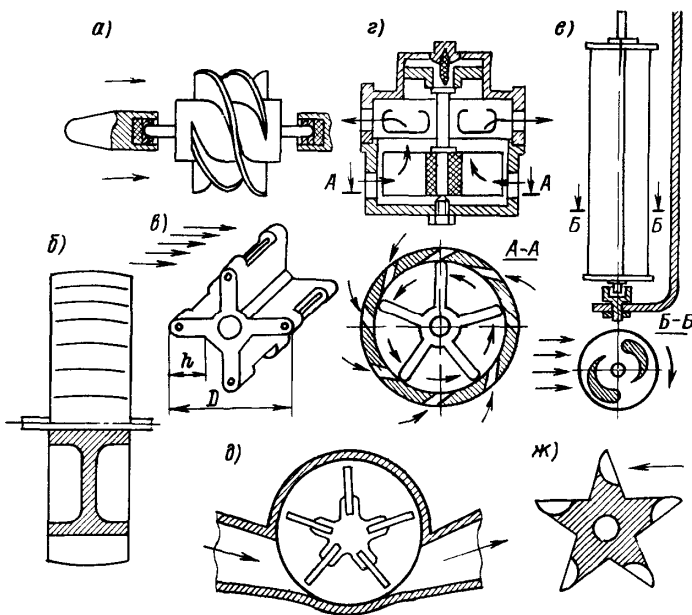


Рис. 4.1. Различные типы турбинок:  
 аксиальные при малом (а) и большом (б) диаметрах; тангенциальные со светоотражающими пластинками (в); в многоструйных водосчетчиках (г); в одноструйных водосчетчиках с полуцилиндрическими лопастями (д) и с лопастями полушаровой формы (ж)

Срок службы турбинного преобразователя, как указывалось выше, определяется износостойкостью опорных узлов, работающих в тяжелых условиях. С уменьшением диаметра цапф осей снижаются как момент трения, так одновременно и срок службы преобразователя. Обычно наибольшую нагрузку испытывает не опорный, а упорный подшипник, который воспринимает динамическое давление потока. Поэтому часто применяют меры для уменьшения давления вдоль оси. Простейший (но не слишком эффективный) метод – расположить турбинку вертикально, а поток подвести снизу, тогда вес турбинки будет частично компенсировать осевую нагрузку.

Более совершенные схемы компенсации основаны на понижении статического давления, действующего на переднюю часть турбинки, или повышении его за турбинкой. Возможные варианты таких схем представлены на рис. 4.2.

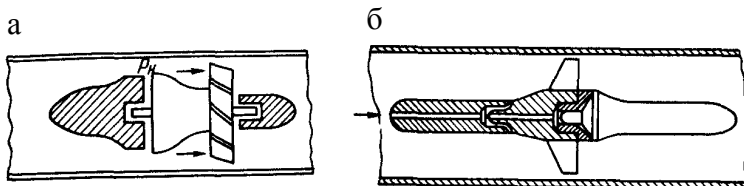


Рис. 4.2. Турбинки с частичной разгрузкой осевого давления потока:  
*а* – за счет снижения давления, действующего на входной торец ступицы;  
*б* – за счет подачи начального давления к задней опоре

Компенсация осевого усилия полезна, так как уменьшает трение в упорном подшипнике и удлиняет срок его службы. Но полное решение этой проблемы состоит в разработке конструкций безопорных турбинных преобразователей, роторы которых уравновешены гидродинамическими силами. При этом может быть достигнуто полное уравновешивание осевого давления.

Конструкция такого прибора приведена на рис. 4.3.

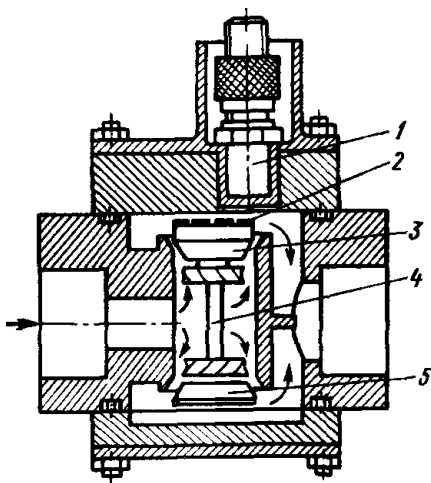


Рис. 4.3. Безопорный турбинный преобразователь

На оси 4, перпендикулярной потоку, укреплены две турбинки и два диска 3 и 5 с конической боковой поверхностью. При появлении расхода жидкости возникает разность давлений на выходе из преобразователя, которая приподнимает ось с дисками и поток, разделяясь на

две ветви, вращает обе турбинки со скоростью, пропорциональной расходу. Магнитные головки 2, закрепленные на верхнем диске 3, при вращении создают в индукционном преобразователе 1 импульсы тока, частота которых пропорциональна частоте вращения турбинок. Подобные преобразователи созданы и работают в Англии и Японии.

Возможны три режима движения жидкости в проточной части турбинки: ламинарный, переходный и турбулентный. Основной диапазон работы соответствует, как правило, турбулентному режиму течения. При этом в автомодельной области сохраняется пропорциональность между расходом и угловой скоростью вращения. Переход на более вязкую жидкость вызывает некоторое увеличение отношения скорости вращения к расходу. Степень возрастания зависит от конструкции турбинки и снижается с уменьшением числа лопастей и угла их подъема (хода лопастей).

Для компенсации влияния вязкости используются различные конструктивные схемы. Одна из них представлена на рис. 4.4. Фирма «Роквелл», например, применяет для этой цели ротор 4, закрепленный на оси 5 турбинки 6 и находящийся в камере 3 внутри переднего обтекателя 1. По трубке 2 в камеру 3 непрерывно поступает хорошо профильтрованная измеряемая жидкость. При увеличении ее вязкости увеличивается сопротивление вращению ротора, что предотвращает изменение отношения «скорость вращения—расход». Магнитная муфта 7 передает вращение турбинки на ось 9, связанную со счетным механизмом 8.

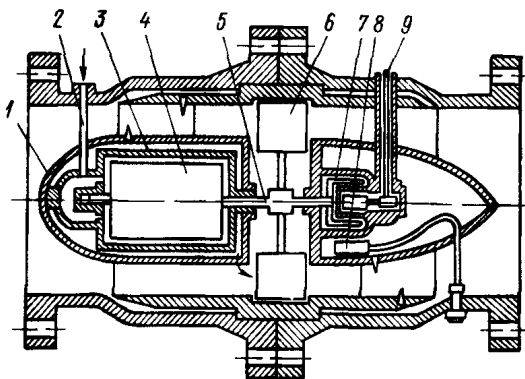


Рис. 4.4. Конструкция турбинки фирмы «Роквелл»

Аксиальные турбинки весьма чувствительны к направлению движения потока, поэтому на входе, а иногда и на выходе в их конструкции устанавливаются лопатки, направляющие поток жидкости или газа. При таком изменении угла атаки этих лопаток можно, вообще говоря, воздействовать на частоту вращения турбинки. Однако, несмотря на наличие направляющего лопаточного агрегата, турбинные расходомеры не следует устанавливать рядом с местными сопротивлениями.

Изменение пространственной ориентации (вертикальная или горизонтальная установка) меняет условия работы подшипников, поэтому может влиять на градуировку. Однако в большинстве конструкций турбинных расходомеров это не столь существенно.

Как уже указывалось, большое значение для стабильности характеристик турбинного преобразователя расхода и обеспечения длительного срока его эксплуатации имеет надежность опор при весьма тяжелых условиях их работы. Высокая скорость вращения и отсутствие в большинстве случаев возможности обеспечения смазки подшипников опор приводит к быстрому износу и выходу из строя. Поэтому желательно, чтобы измеряемая среда обладала смазывающими способностями. Причем изменение смазывающей способности может привести к изменению характеристик турбинного преобразователя.

Недопустимы также любые механические примеси, поскольку в этом случае подшипники турбинки быстро выходят из строя. Изменения температуры и давления измеряемой среды также будут влиять на градуировочную характеристику, главным образом для газов, поскольку изменение плотности вызывает изменение вращающего момента. С уменьшением плотности уменьшается частота вращения турбинки и порог чувствительности возрастает обратно пропорционально корню квадратному из отношения плотностей.

#### **4.2. Устройство тахометрических преобразователей для турбинных расходомеров**

Тахометрический преобразователь обеспечивает преобразование частоты вращения турбинки в сигнал, удобный для измерения, как правило, это электрический частотный сигнал. При этом важно, чтобы тормозящий момент, возникающий в процессе этого преобразования, был как можно меньше по величине. Это особенно важ-

но при измерениях расходов газа и малых диаметрах турбинки, когда движущий момент незначителен. Тахометрические преобразователи подразделяются на индукционные, индуктивные, фотоэлектрические и оптические.

*Индукционные*, или генераторные, преобразователи используют явление возникновения пульсирующего тока в обмотке, расположенной с внешней стороны трубопровода из диамагнитного материала, при вращении рабочего колеса турбинки, в ступице которой находится магнит.

*Индуктивные* преобразователи основаны на изменении индуктивности наружной обмотки в зависимости от изменения сопротивления ее магнитной цепи, происходящего при вращении турбинки. Катушка индуктивности с железным сердечником, отделенная от турбинки диамагнитной стенкой, питается от генератора тока высокой частоты. Во время вращения турбинки при проходе ее лопастей, изготовленных из ферромагнитного материала, мимо катушки изменяется сопротивление ее магнитной цепи, а значит, ее индуктивность. Это вызывает периодическое изменение силы тока в обмотке катушки и соответствующее изменение выходного напряжения. На выходе получается высокочастотный амплитудно-модулированный сигнал.

*Фотоэлектрические* преобразователи используют эффект появления пульсирующего электрического напряжения в цепи фотоэлемента в результате периодического прерывания лопастями вращающейся турбинки луча света, падающего на фотоэлемент. При этом частота пульсаций пропорциональна скорости вращения турбинки (коэффициент пропорциональности определяется числом лопастей).

Также принцип действия оптических преобразователей основан на периодическом прерывании лопастями турбинки светового луча. От источника инфракрасного излучения (светодиода) световой поток вводится в центральный световод из семи кварц-полимерных световодов, образующих волоконно-оптическую линию связи. Далее через гермоввод световой поток попадает на торец лопасти турбинки. Отражаясь от нее, световой поток через гермоввод попадает на торцы шести периферийных световодов волоконно-оптической линии и затем – на чувствительный элемент блока электроники. В качестве гермоввода используется имеющий свойства цилиндрической линзы кварцевый стержень с градиентным распределением коэффициента преломления по радиусу.

### 4.3. Конструкции расходомеров с аксиальной турбинкой

Уже длительное время используются счетчики воды, в которых аксиальная турбинка через шестеренчатый редуктор связана со счетным механизмом. При этом их конструкция постоянно совершенствуется. На рис. 4.5 показано устройство одной из моделей счетчика воды типа УВТ.

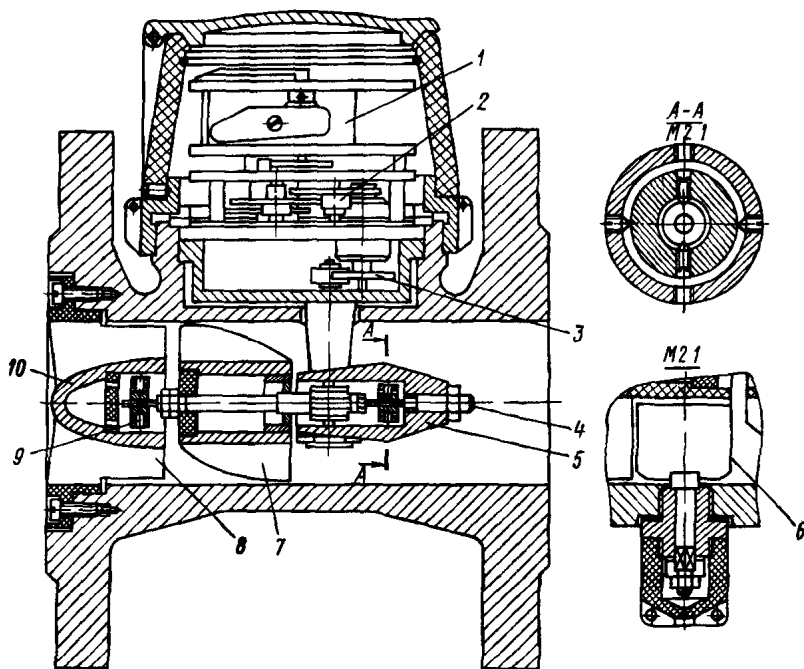


Рис. 4.5. Счетчик типа УВТ

Вода поступает на турбинку 7, проходя через струевыпрямитель 8, на лопатках которого закреплен обтекатель 10, содержащий передний опорный подшипник 9 для оси турбинки. В струевыпрямителе одна из лопастей 6 может поворачиваться при вращении регулировочного винта. Задний опорный подшипник вместе с упорным агатовым наконечником и червячной парой, передающей вращение паре сменных шестерен 3, заключены внутри кронштейна 5. В нем же находятся опоры вертикальной оси червячного колеса. Шестерня 3

вращает магнитную полумуфту, отделенную водонепроницаемой диамагнитной перегородкой от второй полумуфты, соединенной с редуктором 2 и через него – со счетным механизмом 1.

Конструктивно турбинные расходомеры значительно проще счетчиков количества вещества, поскольку в них отсутствует механическая связь между турбинкой и счетным механизмом, которого также в них нет. Поэтому в турбинных расходомерах погрешность преобразования существенно ниже и составляет 0,3–0,5 %.

На рис. 4.6 показан серийно изготавливаемый преобразователь расхода типа ТПР с аксиальной турбинкой.

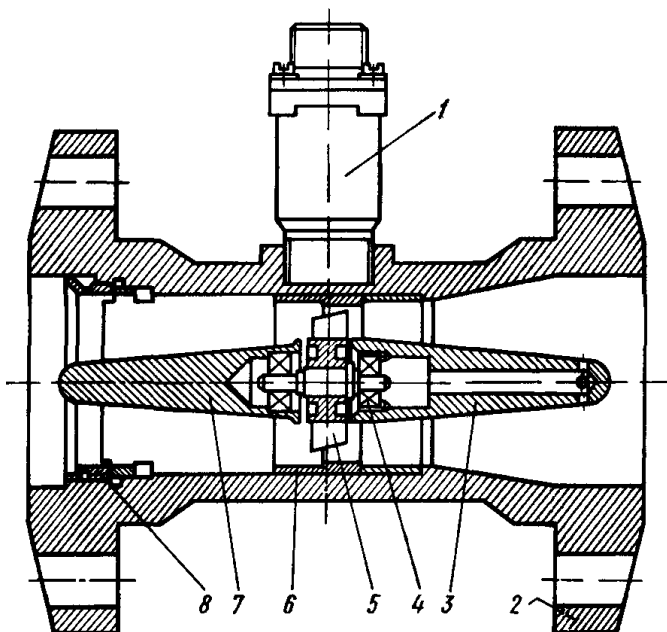


Рис. 4.6. Преобразователь расхода типа ТПР

В корпусе 2 при помощи специальной гайки 8 закреплен обтекатель 7, несущий лопасти струевыпрямителя и образующий опору для переднего подшипника. Второй радиально-упорный подшипник 4 помещен в выходном обтекатель-струевыпрямителе 3. Через отверстие в конце последнего поступает повышенное статическое давление, уменьшающее осевую нагрузку на подшипник 4.



Максимальная частота выходного сигнала, создаваемого магнитоиндукционным преобразователем 1, равна 500 Гц. Амплитуда выходного сигнала на нагрузке 3 кОм – не менее 25 мВ. Преобразователи ТПР изготавливаются для труб диаметром от 10 до 100 мм, приведенная погрешность измерений расхода с их помощью составляет 0,5–1,0 %.

#### 4.4. Конструкции расходомеров с тангенциальной турбинкой

Обычно тангенциальная турбинка применяется для измерений расхода жидкости в трубах небольшого диаметра. Серийно изготавливаемые расходомеры и счетчики с тангенциальной турбинкой предназначены для диаметров труб от 15 до 50 мм, причем расходомеры применяются значительно реже, чем счетчики, но конструкции их более разнообразны.

На рис. 4.7 показан серийный турбинный преобразователь ТПР. Жидкость, поступая по каналу 1, вращает тангенциальную турбинку 2, помещенную в камере 4, и далее по каналу уходит в трубопровод 5. Для улучшения характеристики преобразователя расхода в торцевой стенке камеры 4 сделано несколько глухих отверстий 3, выполняющих роль турбулизаторов. Магнитоиндукционный преобразователь 6 вырабатывает электрический сигнал, частота которого пропорциональна частоте вращения турбинки.

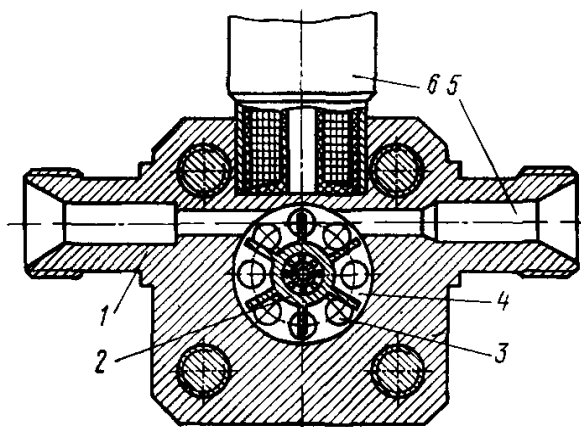


Рис. 4.7. Турбинный преобразователь ТПР

Для измерения пульсирующего расхода была предложена другая конструкция расходомера, представленная на рис. 4.8.

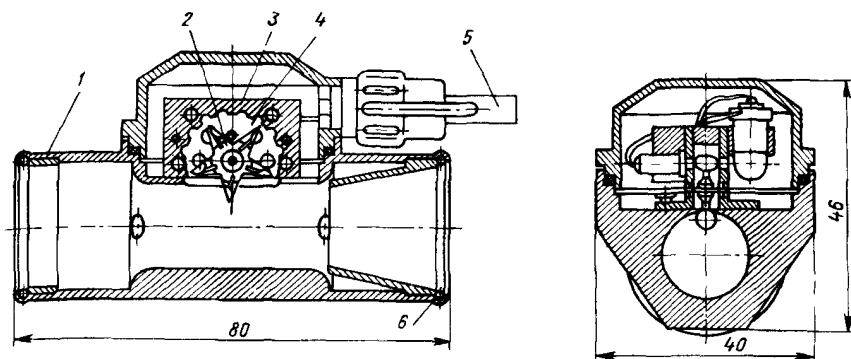


Рис. 4.8. Расходомер для измерения пульсирующего расхода

Тангенциальная турбинка 2 имеет чашеобразные лопасти в виде полусфер из двух склеенных половинок. Турбинка выполнена в центральной части в форме усеченного конуса и имеет ребра жесткости. Она установлена между двух щечек 4 с вкладышем 3, имеющим ряд впадин, играющих роль турбулизаторов потока жидкости. Ось турбинки изготовлена из закаленной стали и установлена в подшипниках из часовых камней. Для формирования потока служат две сетки, установленные в оправке 1, и затем сопло «четверть круга». Для регулировки характеристики преобразователя имеются два обводных канала, расход в которых можно менять с помощью регулировочных винтов. Тахометрический преобразователь – фотоэлектрический.

От рассмотренных выше значительно отличается преобразователь, схема которого приведена на рис. 4.9. Турбинка с большим числом длинных узких лопаток закреплена на консольной оси. Лопатки находятся в кольцевом канале прямоугольной формы, по которому протекает исследуемая жидкость. Взаимодействуя с лопатками, она делает поворот на  $360^\circ$ , создавая значительный движущий момент. Для такой конструкции характерны малое влияние вязкости жидкости и пригодность для труб большого (до 400 мм) диаметра. Кроме того, механические примеси под действием центробежной силы отбрасываются к периферии и не воздействуют на подшипники.

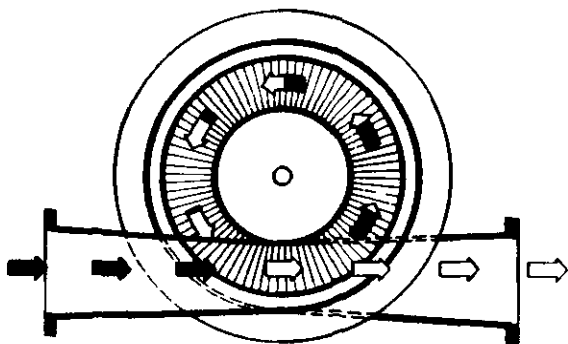


Рис. 4.9. Преобразователь с консольно закрепленной турбинкой

Еще более отличаются конструкции тангенциально-роторных расходомеров, также иногда называемых вихревыми. Ось их ротора перпендикулярна к потоку и смещена в сторону от оси трубы. Поток, тангенциально воздействуя на стержни (рис. 4.10, *а*) или наклонные лопатки (рис. 4.10, *б*), вращает ротор вместе с находящейся внутри него и окружающей жидкостью. Возникающий вихрь вызывает сжатие основного потока.

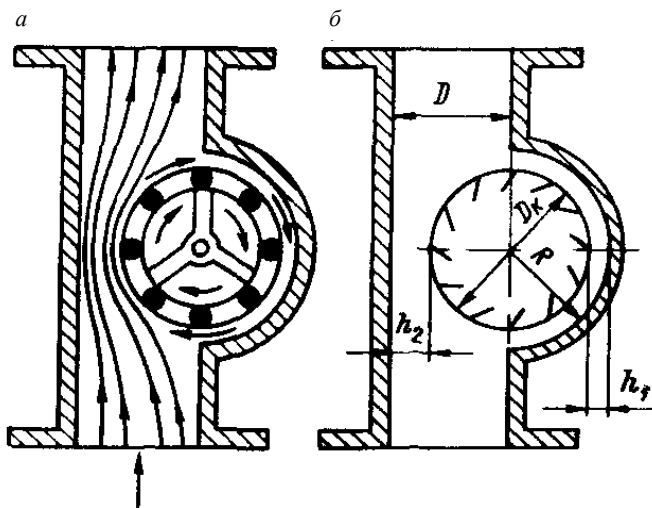


Рис. 4.10. Вихревые расходомеры

## 4.5. Шариковые расходомеры

**Шариковыми** называются расходомеры, подвижный элемент которых – шарик – непрерывно движется по кругу. Это движение обеспечивается или винтовым направляющим аппаратом, закручивающим поток жидкости, или тангенциальным подводом измеряемой среды.

На рис. 4.11 показана схема преобразователя такого типа. Поток, закрученный в направляющем аппарате 1, приводит в движение шарик 5 из ферромагнитного материала, заставляя его вращаться по окружности трубы. Частота вращения шарика, пропорциональная расходу, измеряется с помощью индукционного преобразователя 2. Для стабилизации потока на выходе служат неподвижные лопасти 4, а ограничительное кольцо 3 удерживает шарик от перемещения вдоль трубы.

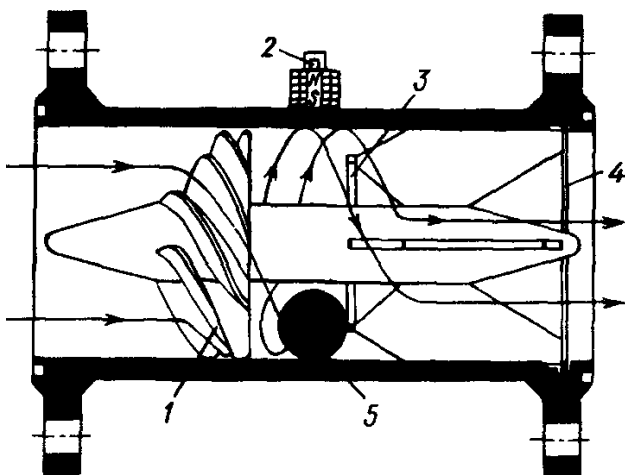


Рис. 4.11. Шариковый преобразователь

Преобразователь с тангенциальным входом показан на рис. 4.12. Такого типа приборы обычно применяются для измерения малых расходов, и их конструкция относительно проста. В этом случае шар под действием центробежной силы прижимается к внутренней поверхности трубы, а его осевое перемещение блокируется ограни-

чительным кольцом. При этом, разумеется, возникают силы механического трения, которые тормозят шар, и в результате его окружная скорость несколько меньше скорости потока. Это отставание оценивается по формулам для механического скольжения, и соответствующую поправку следует делать при использовании такого прибора.

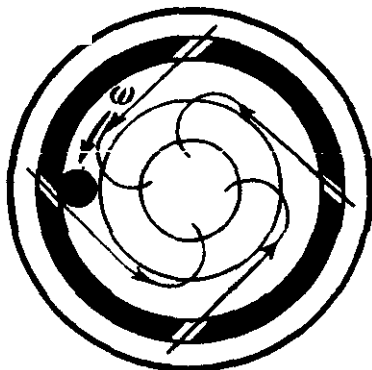


Рис. 4.12. Преобразователь с тангенциальным входом

## 5. ТЕПЛОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

### 5.1. Общая характеристика тепловых расходомеров

*Тепловыми* называются расходомеры, принцип действия которых заключается в использовании зависящего от расхода эффекта теплового воздействия на поток или тело, помещенное в этот поток.

Существует много типов тепловых расходомеров, отличающихся способом нагрева, расположением нагревателя, характером зависимости между расходом и измеряемым сигналом. Как правило, используется способ нагрева электрическим током, проходящим по проводнику. Иногда применяется нагрев с помощью электромагнитного поля или жидкостного теплоносителя, очень редко – индукционный нагрев.

По характеру теплового взаимодействия с потоком расходомеры можно подразделить на калориметрические, термоконвективные и термоанемометрические.

В калориметрических и термоконвективных расходомерах измеряется разность температур газа или жидкости (при постоянной мощности нагрева) или же мощность (при постоянной разности температур).

В термоанемометрических расходомерах измеряется электрическое сопротивление нагреваемого тела (при постоянной силе тока) или же сила тока (при постоянном сопротивлении).

Калориметрические и термоконвективные расходомеры измеряют массовый расход при условии постоянства теплоемкости среды, что является их безусловным достоинством. Для термоконвективных расходомеров характерно отсутствие контакта с измеряемым веществом – это также их достоинство. Существенным недостатком обоих методов является большая инерционность. В отличие от них термоанемометрические расходомеры весьма малоинерционны, но измеряют, как правило, локальную скорость, по величине которой делают выводы о расходе. Приведенные погрешности всех методов обычно находятся в диапазоне 1–3 %.

## 5.2. Калориметрические расходомеры

Калориметрические расходомеры используют зависимость среднемассовой разности температур потока от мощности нагрева и скорости потока.

Калориметрический расходомер (рис. 1.5) имеет нагреватель 3, расположенный внутри трубопровода, и два термопреобразователя 1 и 2 для измерения температур до и после нагревателя. Обычно термопреобразователи располагаются на равных расстояниях от нагревателя.

Очевидно, что распределение температур по обе стороны от источника нагрева будет зависеть от расхода среды, текущей по трубопроводу. При отсутствии расхода температурное поле симметрично (кривая I на рис. 5.1, б). При малых скоростях потока температура перед нагревателем падает, причем иногда даже сильнее, чем за ним (кривая II на рис. 5.1, б). В результате при малых расходах разность температур между двумя термопреобразователями растет (рис. 5.1, в), затем при увеличении расхода температура перед нагревателем становится постоянной (кривая III на рис. 5.1, б), а температура за ним продолжит падение. При этом разность температур будет уменьшаться с дальнейшим увеличением расхода

(см. рис. 5.1, в). Это падение разности температур происходит по гиперболе. При этом чувствительность прибора также падает с ростом расхода. Однако если поддерживать разность температур путем изменения мощности нагрева, то между расходом и потребляемой мощностью установится прямо пропорциональная зависимость (за исключением области малых скоростей). Пропорциональность расхода мощности, потребляемой нагревателем, является достоинством данного метода, но значительно усложняет его реализацию.

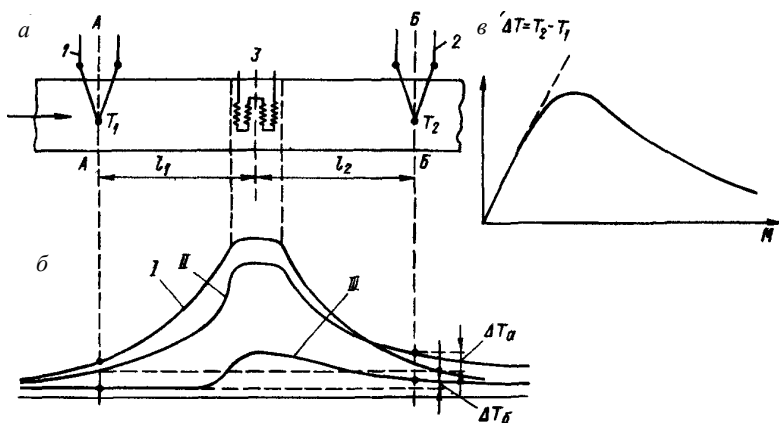


Рис. 5.1. Калориметрический расходомер

Калориметрические расходомеры с внутренним нагревом не получили широкого распространения в промышленности из-за малой надежности работы нагревателей и термопреобразователей в эксплуатационных условиях. Они пригодны для использования в исследовательских целях, а также в качестве образцовых приборов для поверки и градуировки других расходомеров.

### 5.3. Термоконвективные расходомеры

В отличие от вышерассмотренных в термоконвективных тепловых расходомерах ни нагреватель, ни термопреобразователи не вводят внутрь трубопровода, а располагают снаружи. Это существенно повышает эксплуатационную надежность приборов и делает их удобными для использования. Передача тепла от нагревателя к измеряемой среде происходит через стенку трубы.

Выделяют несколько групп термоконвективных расходомеров:

1) квазикалориметрические расходомеры:

*a* – с симметричным расположением нагревателей,

*б* – нагревателем, совмещенным с термопреобразователем,

*в* – нагревом непосредственно стенки трубы,

*г* – асимметричным расположением нагревателей;

2) расходомеры, измеряющие разность температур пограничного слоя;

3) особые расходомеры для труб больших диаметров.

У приборов первой группы градуировочные характеристики, как и у калориметрических, имеют две ветви: восходящую и нисходящую. У приборов второй группы – только одну, так как преобразователь начальной температуры изолирован от нагревательного участка трубы.

Чем больше диаметр трубы, тем в меньшей степени прогревается центральная часть потока и прибор все в большей степени измеряет лишь разность температур внутри пограничного слоя, которая зависит от коэффициента теплоотдачи и, следовательно, скорости потока, рис. 5.2.

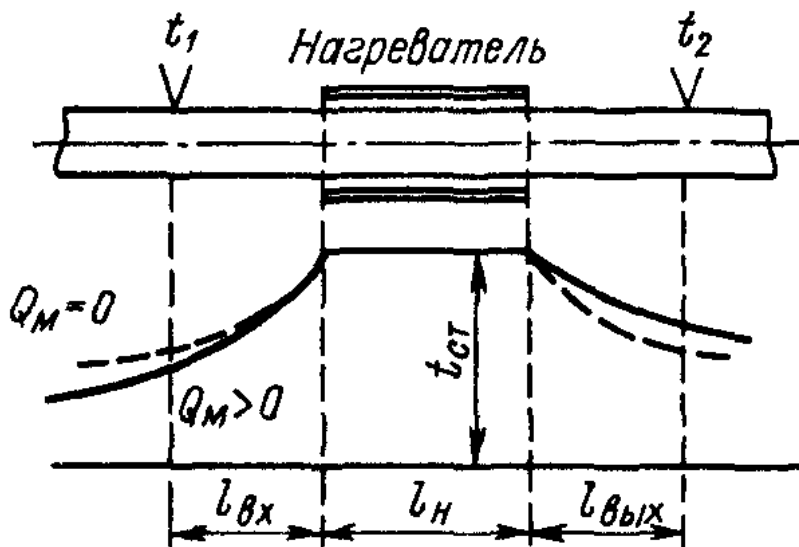


Рис. 5.2. Распределение температур в стенке трубы при наружном нагревателе



### 5.3.1. Расходомеры с симметричным расположением нагревателей

Схема расходомера с симметричным расположением нагревателей, предназначенного для измерения очень малых расходов, приведена на рис. 5.3.

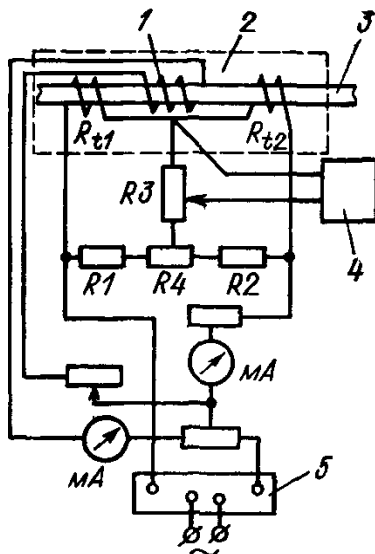


Рис. 5.3. Расходомер с симметричным расположением нагревателей

Измерительная трубка 3 из красной меди заключена в чехол 2, заполненный теплоизолятором – асбестовой крошкой. Трубка имеет внутренний диаметр 0,6 мм, толщину стенки 0,2 мм – для жидкостей и соответственно 3 и 0,5 мм – для газов. На поверхности трубки намотан нагреватель 1 из манганиновой проволоки диаметром 0,2 мм, имеющий сопротивление 10 Ом. Терморезисторы изготовлены из изолированной медной проволоки диаметром 0,06 мм, имеют сопротивление 20 Ом и служат для измерения разности температур с обеих сторон нагревателя. Они включены в мостовую схему со стабилизированным источником питания 5, противоположные плечи которой образуют резисторы также 20 Ом. Реостат служит для установки нуля прибора. При возникновении расхода равновесие моста нарушается, напряжение небаланса подается на вход потенциометра 4.

### 5.3.2. Расходомеры с нагревателем, совмещенным с термопреобразователем

Термоконвективные расходомеры, у которых нагреватель совмещен с термопреобразователем, обладают меньшей инерционностью. Один из вариантов схемы такого прибора приведен на рис. 5.4.

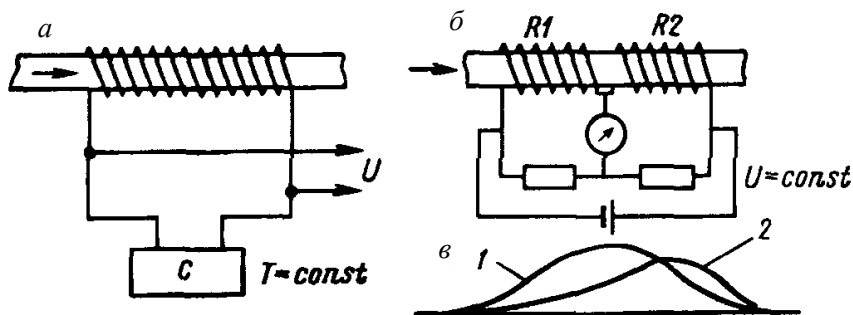


Рис. 5.4. Термоконвективный расходомер

Возможно применение одного нагревателя (рис. 5.4, а), причем прибор содержит стабилизатор температуры нагревателя и, следовательно, работает в режиме  $T = \text{const}$ . С увеличением расхода возрастает количество тепла, отдаваемого нагревателем в поток, поэтому стабилизатор увеличивает напряжение питания нагревателя, чтобы не снижалась температура. Это повышение напряжения и будет выходным сигналом. В другом варианте (рис. 5.4, б) нагреватель состоит из двух секций, являющихся одновременно терморезисторами, включенными в мостовую схему. Они нагреваются током от источника стабилизированного напряжения. При отсутствии расхода распределение температур изображает симметричная кривая (рис. 5.4, в, кривая 1), с появлением расхода распределение температур соответствует кривой 2. Разность температур возрастает с ростом расхода, и прибор, показывающий небаланс моста, может быть проградуирован в единицах расхода.

### 5.3.3. Расходомеры с нагреваемой стенкой трубы

В расходомерах с нагреваемой стенкой трубы отсутствует нагреватель, его роль выполняет участок трубопровода, по которому пропускается ток, как правило переменный (для устранения влияния контактных термоЭДС). Схема расходомера такого типа приведена на рис. 5.5.

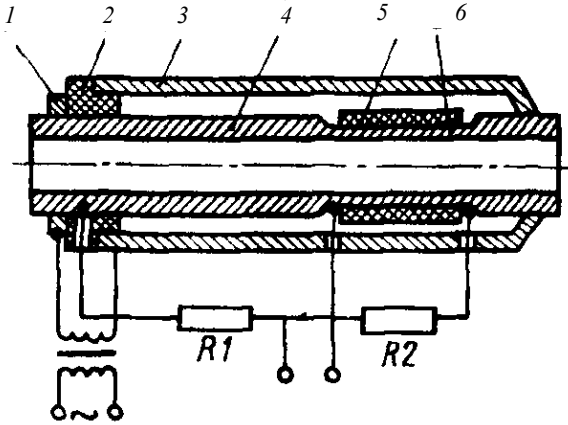


Рис. 5.5. Расходомер

Измерительная труба имеет выточку 6, заполненную теплоизолятором 5. Площадь сечения трубы под выточкой значительно меньше, чем в других частях трубопровода. Снаружи располагается кожух 3 из металла с малым удельным электросопротивлением, правый конец которого приварен к трубе 4, а левый с помощью электроизоляционной втулки 2 укреплен на внешней поверхности трубы. Один конец вторичной обмотки трансформатора питания через кольцо 1 связан с левым концом трубы 4, а другой через кожух 3 – с правым концом той же трубы. Толстый 4 и тонкий 6 участки трубы вместе с резисторами образуют мост. При пропускании тока тонкий участок трубы нагревается больше, чем остальная часть. Сигнал, возникающий в диагонали моста, управляется автоматической системой, увеличивающей мощность нагрева при увеличении нагрева, сохраняя неизменной разность температур между тонким и толстым участками трубы.

### ***5.3.4. Расходомеры с несимметричным расположением термопреобразователей***

У расходомеров с несимметричным расположением термопреобразователей первый по ходу термопреобразователь устанавливается вдали от нагревателя, а второй – рядом с последним. Они не имеют теплоизоляции первого из термопреобразователей от нагревателя, поэтому, как правило, имеется начальная восходящая ветвь кривой температуры (хотя и в незначительной степени). Кроме того, при небольших диаметрах трубопровода происходит прогрев всего потока, а не только пограничного слоя. Вообще говоря, эти расходомеры близки к рассматриваемым далее расходомерам пограничного слоя.

### ***5.3.5. Расходомеры, измеряющие разность температур пограничного слоя***

Расходомеры, измеряющие разность температур пограничного слоя, отличаются тем, что тепло от нагревателя практически не достигает термопреобразователя, расположенного выше по потоку. Это обусловлено тем, что первый термопреобразователь достаточно удален от нагревателя и между ними располагается теплоизолирующая прокладка. Второй термопреобразователь располагается максимально близко к нагревателю. Другой их существенный признак – отсутствие прогрева центральной части потока, поскольку используют такие расходомеры для труб с диаметром более 50 мм. В результате в приборах этого типа измеряется не разность средних температур потока до и после нагревателя, а разность температур на стенке и внешней границе пограничного слоя.

Термопреобразователь 1 (рис. 5.6, а) с помощью теплонепроводящей прокладки 2 изолирован от участка трубы, на котором установлен нагреватель 3. Рядом с нагревателем размещен второй термопреобразователь 4, измеряющий температуру нагретой трубы.

Можно показать, что результаты измерений в этом случае зависят от теплопроводности, теплоемкости и вязкости жидкости или газа, которые изменяются не только при варьировании среды, но и при изменении давления и температуры. Для уменьшения этого влияния применяются более сложные схемы с дополнительными термопреобразователями.

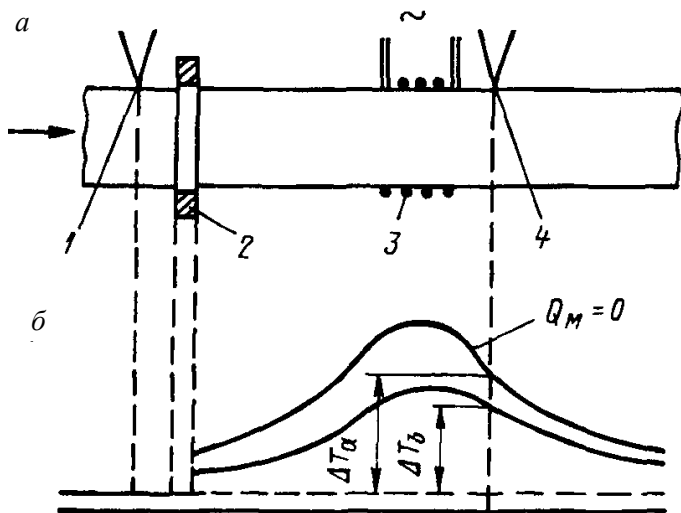


Рис. 5.6. Термопреобразователь

## 5.4. Термоанемометры

Принцип действия термоанемометра заключается в использовании зависимости между потерей тепла непрерывно нагреваемого тела и скоростью потока жидкости или газа, в которых это тело находится. Таким образом, основная функция термоанемометра – измерение локальной скорости потока, и он может использоваться для определения расхода, если известна связь между местной и средней скоростью потока (или когда средняя скорость измеряется с помощью термоанемометра).

Существуют два типа термоанемометров: с постоянной силой тока нагрева или с постоянным сопротивлением нагреваемого тела. В первом случае измеряется электрическое сопротивление нагреваемого датчика, во втором – сила тока, необходимого для нагрева. Указанные величины являются, очевидно, функциями скорости обтекающего потока, поскольку теплоотдача нагретого тела зависит от скорости обтекания. К достоинствам термоанемометров относятся большой динамический диапазон, высокое быстродействие, позволяющее варьировать скорости, изменяющиеся с частотой в несколько тысяч герц. Недостаток термоанемометров – хрупкость

чувствительного элемента, изменение градуировки вследствие старения или появления на нем отложений, особые требования к чистоте среды и ее электропроводности.

Первичные преобразователи термоанемометров разделяются на проволочные, пленочные и терморезисторные.

Чувствительный элемент проволочного датчика – тонкая и короткая проволочка из платины, вольфрама или никеля. Обычно диаметр проволочной нити 0,005–0,3 мм, а ее длина 0,5–10 мм. Концы проволоки приваривают к двум заостренным манганиновым стержням, закрепленным в жестком корпусе. Наибольшую температуру нагрева допускает платина (до 1000 °С), торированный вольфрам может быть нагрет до 600 °С. Во избежание быстрого старения рабочую температуру проволочной нити, как правило, выбирают в пределах 400–500 °С.

Пленочный преобразователь обычно представляет собой круглый стеклянный стержень диаметром в несколько миллиметров, с клинообразным или конусообразным концом, на котором напылена пленка платины толщиной 0,5–1·10<sup>-2</sup> мкм (50–100 Å, 1 Å = 10<sup>-8</sup> см) в виде небольшой полоски (длиной около 1 мм и шириной около 0,2 мм). Концы полоски соединены с проводами, проходящими внутри стеклянного стержня. Для измерений в электропроводящих средах на пленку может наноситься кварцевое покрытие (также очень тонкое). Пленочные преобразователи значительно прочнее проволочных.

Чувствительным элементом терморезисторного преобразователя служит миниатюрный полупроводниковый терморезистор, обычно имеющей форму шарика. Его достоинства – простота конструкции, механическая прочность и высокая чувствительность. Недостаток – нестабильность градуировки во времени, но с этим недостатком борются, и небезуспешно. Постоянная времени у терморезисторов больше, чем у проволочных датчиков, и обычно составляет 0,5–2,5 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>1. РАСХОДОМЕРЫ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ</b> .....	4
<b>2. РАСХОДОМЕРЫ ПЕРЕМЕННОГО УРОВНЯ</b> .....	13
2.1. Расходомеры с затопленным отверстием истечения .....	13
2.2. Щелевые расходомеры с неподвижным сосудом.....	14
2.3. Расходомеры переменного уровня с подвижным сосудом ..	17
<b>3. РАСХОДОМЕРЫ ОБТЕКАНИЯ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА</b> .....	18
3.1. Ротамеры.....	18
3.2. Поплавковые расходомеры.....	21
3.3. Поршневые расходомеры .....	22
3.4. Расходомеры с изменяющимся перепадом давления.....	22
3.5. Расходомеры с поворотной лопастью .....	23
<b>4. ТУРБИННЫЕ РАСХОДОМЕРЫ</b> .....	24
4.1. Общая характеристика .....	24
4.2. Устройство тахометрических преобразователей для турбинных расходомеров.....	28
4.3. Конструкции расходомеров с аксиальной турбинкой .....	30
4.4. Конструкции расходомеров с тангенциальной турбинкой ..	32
4.5. Шариковые расходомеры .....	35
<b>5. ТЕПЛОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ</b> .....	36
5.1. Общая характеристика тепловых расходомеров .....	36
5.2. Калориметрические расходомеры .....	37
5.3. Термоконвективные расходомеры.....	38
5.4. Термоанемометры .....	44

Учебное издание

**КУЛЕБЯКИН** Виталий Васильевич

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА  
ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ**

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности  
1-43 01 04 «Тепловые электрические станции»

Редактор *Т. Н. Микулик*

Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 27.10.2017. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,67. Уч.-изд. л. 2,09. Тираж 100. Заказ 819.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.