

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Общие сведения

Термином расход обозначают величину, равную количеству жидкого или газообразного вещества, протекающего по трубопроводу в единицу времени. Различают расходы объемный и массовый, которые выражаются соответственно в $\text{м}^3/\text{с}$ и $\text{кг}/\text{с}$ (или в других производных единицах: $\text{м}^3/\text{ч}$, $\text{т}/\text{ч}$, $\text{л}/\text{мин}$ и т. д.).

Общие сведения

Приборы, указывающие величину мгновенного расхода, называются расходомерами.

Для измерений расхода иногда пользуются счетчиками количества и приборами времени. В этом случае средний расход определяют как частное от деления показаний счетчика на время.

Расходомеры часто снабжаются интеграторами, с помощью которых можно определить количество прошедшей через трубопровод рабочей среды.

Общие сведения

В холодильной технике измерение расхода играет важную роль при определении холодопроизводительности компрессоров и машин, производительности насосов и вентиляторов, для оценки потребления охлаждающей воды и др.

Особенность измерений состоит в том, что рабочие вещества холодильных машин не всегда являются однофазными. Нередко по трубопроводам протекают парожидкостные смеси, смеси холодильных агентов с маслами.

Общие сведения

Современная техника не имеет надежных методов измерений расхода неоднофазных сред. Поэтому методы измерений и испытаний должны строиться таким образом, чтобы исключить прохождение таких сред через расходомеры и создать надежный контроль состояния, рабочей среды и условий измерений.

Общие сведения

При измерении расхода жидкого холодильного агента необходимо обеспечить переохлаждение жидкости. Величина этого переохлаждения определяет допустимый перепад давления на преобразователе расходомера.

Общие сведения

Эта задача формулируется так:

$$\Delta p_p \leq p_{вх} - p_0$$

где Δp_p — падение давления в расходомере;
 $p_{вх}$ — давление холодильного агента перед входом расходомера; —
давление насыщения холодильного агента при температуре $t_{вх} + a$, где a рекомендуется принимать не менее $3\text{ }^\circ\text{C}$;
 $t_{вх}$ — температура переохлажденного холодильного агента перед входом расходомера.

Общие сведения

При измерении расхода парообразного холодильного агента на выходе из испарителя во избежание погрешностей из-за выброса капель неиспарившейся жидкости пар должен быть перегрет.

В случае использования фреонов желательно, чтобы этот перегрев был не меньше

8—10 °С, аммиака — порядка 3—5°С.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАСХОДА

Современная измерительная техника располагает большим числом способов преобразования расходов. В основном это преобразователи, в которых чувствительные элементы реагируют на скорость потока жидкости или газа. Лишь в счетчиках и мерных сосудах, с помощью которых измеряют количество вещества, измеряемой величиной является объем жидкости или газа за некоторый интервал времени. Преобразователи, воспринимающие расход через скорость потока, как правило, являются многоступенчатыми, т. е. расход преобразуется в некоторую промежуточную величину, которая затем в свою очередь преобразуется в величину, удобную для дальнейшего использования.

Физические основы первичных преобразователей расхода

В зависимости от выходной величины первичные преобразователи разделяются на следующие виды:

- преобразователи расхода в переменный перепад давления; к ним относятся сужающие устройства (диафрагмы, сопла), которые преобразуют расход в перепад давления; последний воспринимается преобразователем разности давлений (например, дифманометром). К этой группе преобразователей примыкают напорные трубки, которые преобразуют местную скорость потока в перепад давления.

Физические основы первичных преобразователей расхода

- преобразователи расхода в положение (высоту подъема) обтекаемого поплавка (преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления). Приборы с такими преобразователями получили название ротаметров;
- тахиметрические преобразователи, в которых расход преобразуется в частоту вращения крыльчатки (турбинный расходомер) или шарика (шариковый расходомер), которая измеряется с помощью частотомера;
- электромагнитные преобразователи, в которых расход преобразуется в ЭДС, наводимую в самом потоке электропроводной жидкости.

СУЖАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Сужающие устройства предназначены для преобразования расхода в перепад давления.

Известно большое число сужающих устройств, однако широкое применение в технике измерений нашли диафрагмы и сопла. Реже используют сопла и трубы Вентури.

Сужающие устройства

Принцип действия сужающего устройства состоит в том, что при прохождении жидкости через местное сужение наблюдается изменение статического давления.

Сужающие устройства

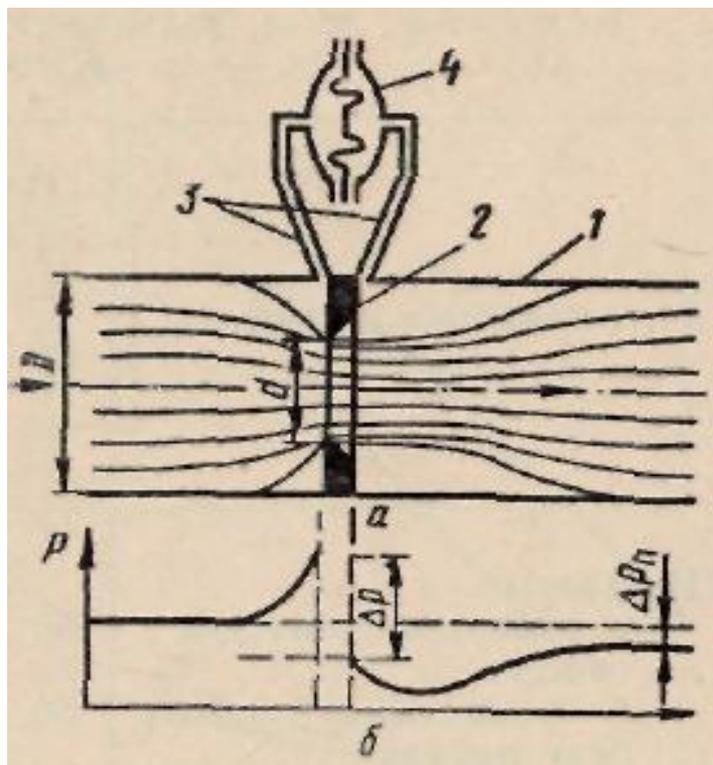


Схема (а) и диаграмма давления (б) сужающего устройства:

- 1 — труба; 2 — сужающее устройство;
- 3 — трубки отбора давлений; 4 — дифманометр

Сужающие устройства

Видно, что в непосредственной близости от сужающего устройства наблюдается перепад давления Δp , который является выходной величиной преобразователя и воспринимается следующей ступенью преобразования — дифманометром. Из графика также видно, что давление на выходе восстанавливается не полностью. Имеет место необратимая потеря давления $\Delta p_{\text{п}}$.

Сужающие устройства

Уравнения для определения расхода несжимаемой жидкости имеют вид:
для объемного расхода V (м³/с)

$$V = \alpha F_0 \sqrt{2\Delta p / \rho}$$

для массового расхода m_t (кг/с)

$$m_t = \alpha F_0 \sqrt{2\rho\Delta p}$$

где α — коэффициент расхода; F_0 — площадь отверстия сужающего устройства, м²; ρ — плотность измеряемой среды, кг/м³; Δp — перепад давления, Па.

Сужающие устройства

Если измеряется расход сжимаемой среды (пар, газ), то уравнения примут

вид:

$$V = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2 \Delta p / \rho}$$

$$m_t = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2 \rho \Delta p}$$

где ε — коэффициент расширения.

Сужающие устройства

При расчете сужающих устройств имеет значение величина $m=(d/D)^2$, где d — диаметр отверстия сужающего устройства; D — диаметр трубопровода. Величина m называется относительной площадью, или модулем, сужающего устройства.

Сужающие устройства

Сужающие устройства подразделяют на стандартные, или нормальные, и нестандартные. Выбор и расчет стандартных сужающих устройств регламентирован Правилами измерения расхода. Выполненные в соответствии с Правилами сужающие устройства имеют заданные метрологические характеристики и не нуждаются в экспериментальной поверке.

Нестандартные сужающие устройства рассчитываются тем же путем, однако их расчетные погрешности не могут быть гарантированы без соответствующей экспериментальной поверки.

Расчет стандартных сужающих устройств

В соответствии с Правилами стандартные сужающие устройства должны удовлетворять требованиям.

Если расходомер заказывается на заводе-изготовителе, то обычно сужающее устройство изготавливается и поставляется в комплекте с дифманометром.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СУЖАЮЩИМ УСТРОЙСТВАМ

Вид сужающего устройства	Диаметр трубопровода D , мм		Относительная площадь m		Минимально допустимый диаметр отверстия, мм
	минимальный	максимальный	минимальная	максимальная	
Диафрагма					
с угловым способом отбора	50	1000	0,05	0,64	12,5
с фланцевым способом отбора	50	760	0,04	0,56	12,5
Сопло					
для измерения расхода газа	50	Неограничен	0,05	0,64	15
для измерения расхода жидкости	30	То же	0,05	0,64	15
Сопло Вентури	65	500	0,05	0,60	15
Труба Вентури	50	1400	0,1	0,60	15

Расчет стандартных сужающих устройств

Расчет сужающего устройства осуществляется заводом-изготовителем по опросному листу, составляемому заказчиком. При этом обуславливаются основные параметры измеряемой среды и условия измерений. Если в реальной эксплуатации эти параметры и условия будут изменены, то градуировка расходомера должна быть пересчитана в соответствии с приведенными выше формулами.

Следует иметь в виду, что в комплекте с дифманометрами поставляются только диафрагмы, что несколько сужает возможности данного способа измерений.

Расчет стандартных сужающих устройств

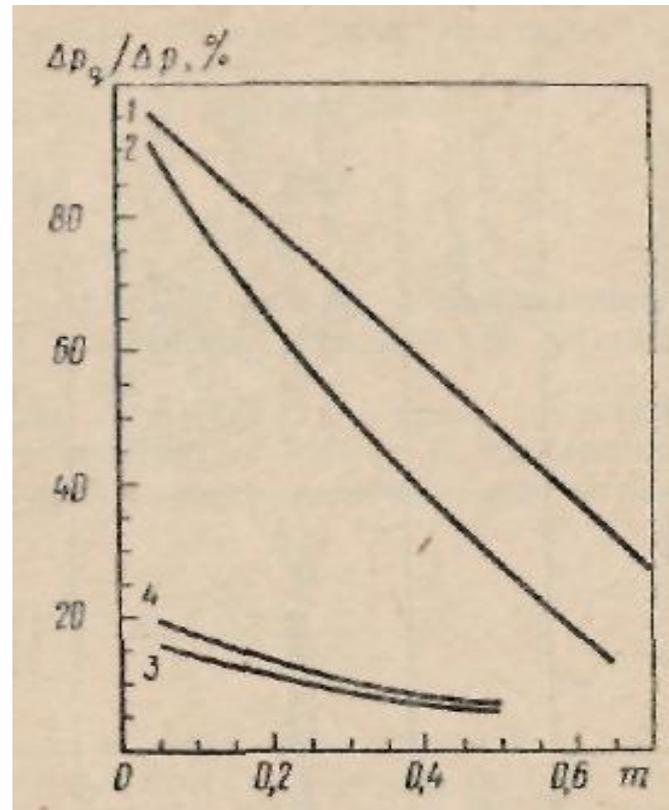
Выбор сужающего устройства ведут, исходя из следующих соображений:

- измерение тем точнее, чем меньше величина m ;
- уменьшение m при прочих равных условиях обеспечивает большие перепады давления;
- чем больше перепад давления, тем больше необратимые потери давления;

Расчет стандартных сужающих устройств

- потеря давления в сужающих устройствах при одних и тех же m уменьшается в следующей последовательности: диафрагма, сопло, короткое сопло Вентури, длинное сопло Вентури, труба Вентури;
- точность измерения повышается в той же последовательности;
- сложность и стоимость сужающего устройства повышаются в той же последовательности.

Расчет стандартных сужающих устройств



Потеря давления в сужающем устройстве:
1 — диафрагма; 2 — сопло; 3 — длинное сопло Вентури; 4 — короткое сопло Вентури

Расчет стандартных сужающих устройств

Порядок расчета. Если задана допустимая потеря давления $\Delta p_{\text{п.д}}$ в сужающем устройстве при расходе V_{max} , то при измерении расхода жидкости находят вспомогательную величину C :

$$C = V_{\text{max}} \sqrt{\rho} / (0,01252 D^2)$$

где V_{max} — предельный расчетный расход, $\text{м}^3/\text{ч}$; ρ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; D — диаметр трубопровода, мм .

Расчет стандартных сужающих устройств

Приведенные в Правилах номограммы позволяют по величинам $\Delta p_{п.д}$ и C найти величину номинального перепада давления Δp_n , соответствующую расходу V_{max} , и приближенный модуль.

По приближенному значению m выясняют, лежит ли число Рейнольдса Re в допустимых пределах.

Расчет стандартных сужающих устройств

Для этого вычисляют Re :

$$Re = \frac{4 V_{\text{ср}}}{\pi D \nu}$$

где $V_{\text{ср}}$ — среднее значение **расхода**, $\text{м}^3/\text{с}$;
 D — диаметр трубопровода, м ; ν —
кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$

Расчет стандартных сужающих устройств

Расчет продолжают, если значение Re лежит в пределах, указанных в таблице. Если Re меньше минимально допустимого значения, то это обозначает, что данный метод измерений в заданных условиях неприменим. Возможный путь — уменьшение диаметра трубопровода. Продолжая расчет, по величине Δp_n подбирают соответствующий дифманометр (величину Δp_n принимают за верхний предел измерения перепада давления).

Расчет стандартных сужающих устройств

Вычисляют вспомогательную величину

$$m\alpha = C / \sqrt{\Delta p_{\text{н}}}$$

Коэффициент расхода α находят по соответствующим таблицам, приведенным в Правилах, либо по формулам, приведенным в таблице. Далее находят точное значение величины m , деля результат вычисления по формуле на α .

Расчетные формулы для коэффициента расхода и допустимые пределы числа Re

Вид сужающего устройства	Формула коэффициента расхода	Пределы числа Рейнольдса
Диафрагма угловым отбора с способом	$\alpha_y = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \left[0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,1840m^4 + 0,0029m^{1,25} \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{0,75} \right]$	Для $0,05 \leq m \leq 0,20$ $5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^8$; для $0,20 \leq m \leq 0,59$ $10^4 \leq Re \leq 10^8$; для $0,59 \leq m \leq 0,64$ $2 \cdot 10^4 \leq Re \leq 10^8$
Диафрагма фланцевым отбора с способом	$\alpha_\phi = \alpha_y + \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \left[0,09l_1m^2(1-m^2)^{-1} - 0,0337l_2m^{1,5} \right]$ $l_1 = 0,4333 \quad \text{при} \quad D \leq 58,62 \text{ мм}$ $l_1 = 25,4/D \quad \text{при} \quad D > 58,62 \text{ мм}$	$1260mD \leq Re \leq 10^8$
Сопло и сопло Вентури	$\alpha_c = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \left[0,99 - 0,2262m^{2,05} + (0,000215 - 0,001125m^{0,5} + 0,00249m^{2,35}) \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{1,15} \right]$	Для $0,05 \leq m \leq 0,20$ $7 \cdot 10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6$; для $0,20 \leq m \leq 0,6$ $2 \cdot 10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6$
Труба Вентури	$\alpha_\tau = \frac{0,985}{\sqrt{1-m^2}} \quad (\text{с точность } \pm 1\% \text{ при } 0,1 \leq m \leq 0,6)$	$1 \cdot 10^5 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6$

Расчет стандартных сужающих устройств

Искомый диаметр отверстия вычисляют по формуле

$$d_{20} = \frac{D}{K_t} \sqrt{m}$$

где d_{20} — диаметр отверстия при $t = 20$ °С, мм; K_t — поправочный множитель на тепловое расширение материала сужающего устройства; приводится в таблицах.

Расчет стандартных сужающих устройств

Расчет сужающих устройств для газообразных сред проводят аналогичным путем, однако вспомогательную величину C вычисляют с учетом приведения параметров газа к нормальному состоянию ($t = 20^\circ\text{C}$, $p_{\text{абс}} = 760$ мм рт. ст.):

$$C = \frac{V_{\text{НОМ}}}{0,2109 D^2} \sqrt{\frac{\rho_{\text{НОМ}} T K}{p}}$$

где $V_{\text{НОМ}}$ — объемный расход газа в нормальном состоянии, $\text{м}^3/\text{ч}$; $\rho_{\text{НОМ}}$ — плотность сухого газа в нормальном состоянии, $\text{кг}/\text{м}^3$; T — абсолютная температура перед сужающим устройством, K .

Расчет стандартных сужающих устройств

K — коэффициент сжимаемости газа:

$$K = \frac{pv}{(pv)_0} \frac{273,2}{T}$$

p — абсолютное давление, Па; v — удельный объем, м³/кг; $(pv)_0$ — произведение при $t = 0^\circ\text{C}$, $p = 101,3 \cdot 10^3$ Па (760 мм рт. ст.).

Расчет стандартных сужающих устройств

Пользуясь номограммами, находят, как в предыдущем случае, приближенную величину m и перепад давления Δp , а также коэффициент расхода α . Далее определяют Re и сравнивают с предельными значениями из таблицы. Если Re находится в допустимых пределах, расчет продолжают.

Расчет стандартных сужающих устройств

Затем производят последовательно вычисления величин $m\alpha$:

$$(m\alpha)_1 = \frac{C}{\varepsilon_1 \sqrt{\Delta p}}$$

Коэффициент ε_1 определяют по таблицам, построенным в зависимости от отношения $\Delta p / p$, модуля m и показателя адиабаты газа. При этом берут приближенное значение m . Делят $(m\alpha)_1$ на α и получают точное значение m_1 . Для него находят ε_2 . Если $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 \leq 0,0005$, то расчет заканчивают: m_1 и ε_2 принимают за окончательные результаты. Если $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 > 0,0005$, то находят новую величину:

$$(m\alpha)_2 = \frac{C}{\varepsilon_2 \sqrt{\Delta p}}$$

Расчет стандартных сужающих устройств

Вновь определяют точные m_2 и ε_3 и проверяют условие $\varepsilon_2 - \varepsilon_3 \leq 0,0005$. Если оно выполняется, то результаты m_2 и ε_3 принимают за окончательные.

Если условие не выполняется, расчет продолжают дальше, пока разность не станет меньше 0,0005. По завершении расчета рекомендуется провести проверку результатов по формулам для расхода.

Расчет стандартных сужающих устройств

Для обеспечения измерения с заданной погрешностью имеет значение соблюдение конструктивных размеров сужающих устройств и правильность их монтажа на трубопроводах.

Конструктивные размеры сужающих устройств приведены в Правилах.

Расчет стандартных сужающих устройств

Особое внимание следует уделять устройству прямых участков до сужающих устройств и после них. Длина прямого участка до сужающего устройства зависит от характера местных сопротивлений и модуля m . При малых m достаточной оказывается длина прямого участка до сужающего устройства $(15 \div 20)D$, в то время как для больших m эта величина может достигать $(80 \div 100)D$. Длина прямого участка после сужающего устройства зависит только от величины m . Для $m = 0,05$ эта длина должна быть не менее $4D$, а для $m=0,64$ — не менее $8,2D$.

Расчет стандартных сужающих устройств

Измерение сужающими устройствами сопровождается суммарной (методической и инструментальной) погрешностью, предельное значение которой можно вычислить по формулам:
для жидкости

$$\sigma_v = 2\sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_{Re}^2 + \sigma_{DM}^2 + 25\sigma_\rho^2}$$

Расчет стандартных сужающих устройств

для газа

$$\sigma_v = 2\sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_{\text{Re}}^2 + \sigma_{\text{дм}}^2 + 25(\sigma_\rho^2 + \sigma_p^2 + \sigma_T^2 + \sigma_K^2)}$$

где величины σ — средние квадратические относительные погрешности соответствующих величин, обозначенных индексами: α — коэффициента расхода; ε — коэффициента расширения; Re — коэффициента коррекции на число Рейнольдса; дм — дифманометра; ρ — плотности; p — давления; T — температуры; K — коэффициента сжимаемости.

В Правилах приведены формулы для определения каждой из составляющих.

Расчет стандартных сужающих устройств

Если в качестве примера взять диафрагму

с $m = 0,2$ и $\alpha = 0,8$ при достаточно

большом Re ($\beta = 0$) и приняв $\sigma_{DM} = 1\%$ ($\beta =$

1) $\sigma_{\rho} = 1\%$

($\beta = 1$), то σ_{α} , вычисленная по

рекомендуемой Правилами формуле,

составит $\sigma_{\alpha} = 0,31$ ($\beta = 0,1$), а предельная

погрешность

$$\sigma_v = 2\sqrt{0,1 + 0 + 1 + 251} = 2,3\%$$

Расчет стандартных сужающих устройств

Особым случаем является применение сопел на трубопроводах диаметром $30 \text{ мм} \leq D \leq 50 \text{ мм}$.

В этом случае средняя квадратическая погрешность коэффициента расхода

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\alpha_{50}} + 1,5 - 0,03D$$

где $\sigma_{\alpha_{50}}$ -- погрешность коэффициента расхода сопла при его установке на трубопровод диаметром 50 мм.

Расчет нестандартных сужающих устройств

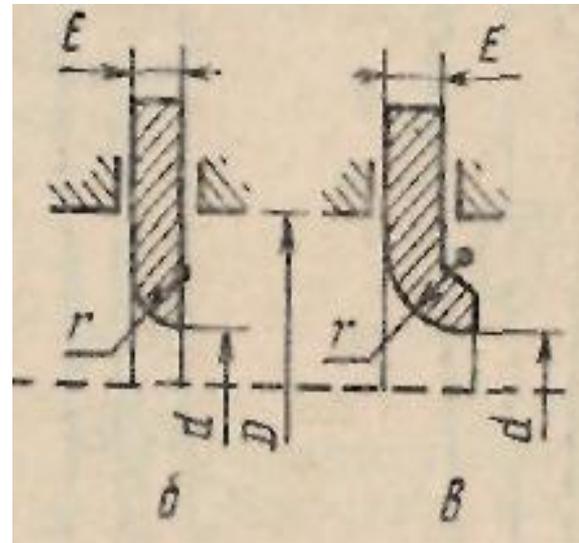
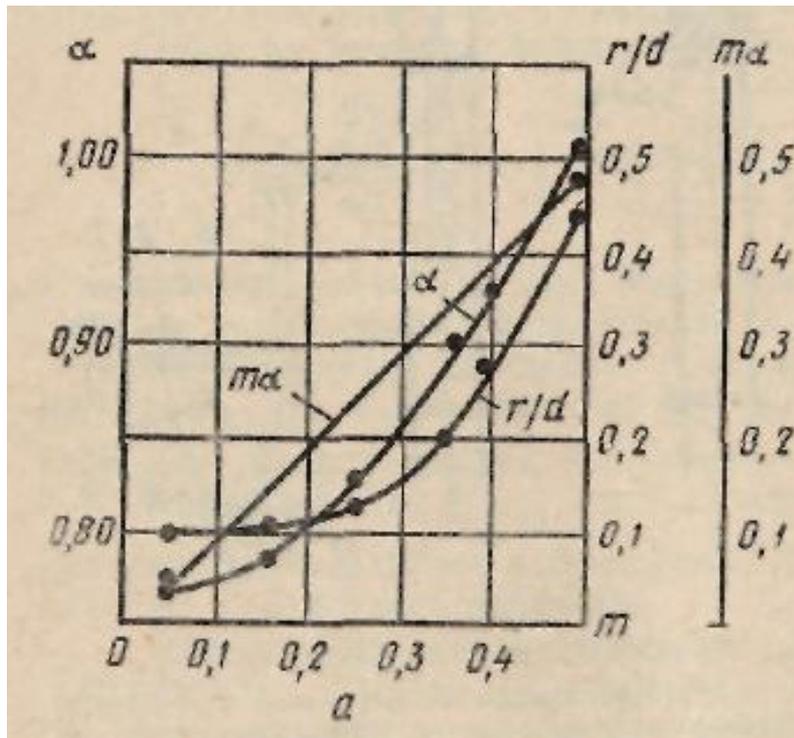
Из формулы следует, что при $D = 30$ мм погрешность увеличивается на 0,6% по сравнению с $\sigma_{\alpha_{50}}$.

Расчет нестандартных сужающих устройств

Нестандартные сужающие устройства применяют, когда диаметр трубопровода и число Рейнольдса не удовлетворяют требованиям, приведенным в таблицах.

Известно несколько типов нестандартных сужающих устройств, однако наибольшее признание получило сопло с профилем в четверть окружности, или, как его называют, сопло «четверть круга». Это сопло характеризуется наиболее постоянным коэффициентом расхода в достаточно широком диапазоне чисел Re .

Расчет стандартных сужающих устройств



Сопло «четверть круга»:

- а — зависимости коэффициента расхода α от отношения r/d и величины $m\alpha$ от модуля m ;
- б — профиль сопла при $r=E$;
- в — профиль сопла при $r>E$

Расчет стандартных сужающих устройств

На основании обобщений

многочисленных экспериментальных данных П.П.Кремлевский рекомендует ограничить нижний предел числа

Рейнольдса $Re_{\min} \geq (3 \div 5) 10^3$, а верхний $Re_{\max} \leq 10^5$.

Расчет стандартных сужающих устройств

Расчет сопла может быть выполнен в следующем порядке:

- а) проверяют величину Re и убеждаются, что она не выходит за пределы рекомендуемых Re_{\min} и Re_{\max} ;
- б) задаются величиной перепада давления Δp ;

Расчет стандартных сужающих устройств

в) по формуле находят величину $m\alpha$,
подставляя $F_0 = \rho d^2/4 = (\rho/4) mD^2$:

$$m\alpha = \frac{4V}{\pi D^2} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta p}}$$

г) с помощью графика (см. рис. выше) по значению $m\alpha$ находят приближенное m и соответствующее ему α ;

Расчет стандартных сужающих устройств

- д) из формулы

$$m\alpha = C/\sqrt{\Delta p_{\text{н}}}$$

подставляя найденное α , определяют точное значение m и по нему — d ;

- е) по графику находят отношение r/d и соответствующее ему значение r .

Расчет стандартных сужающих устройств

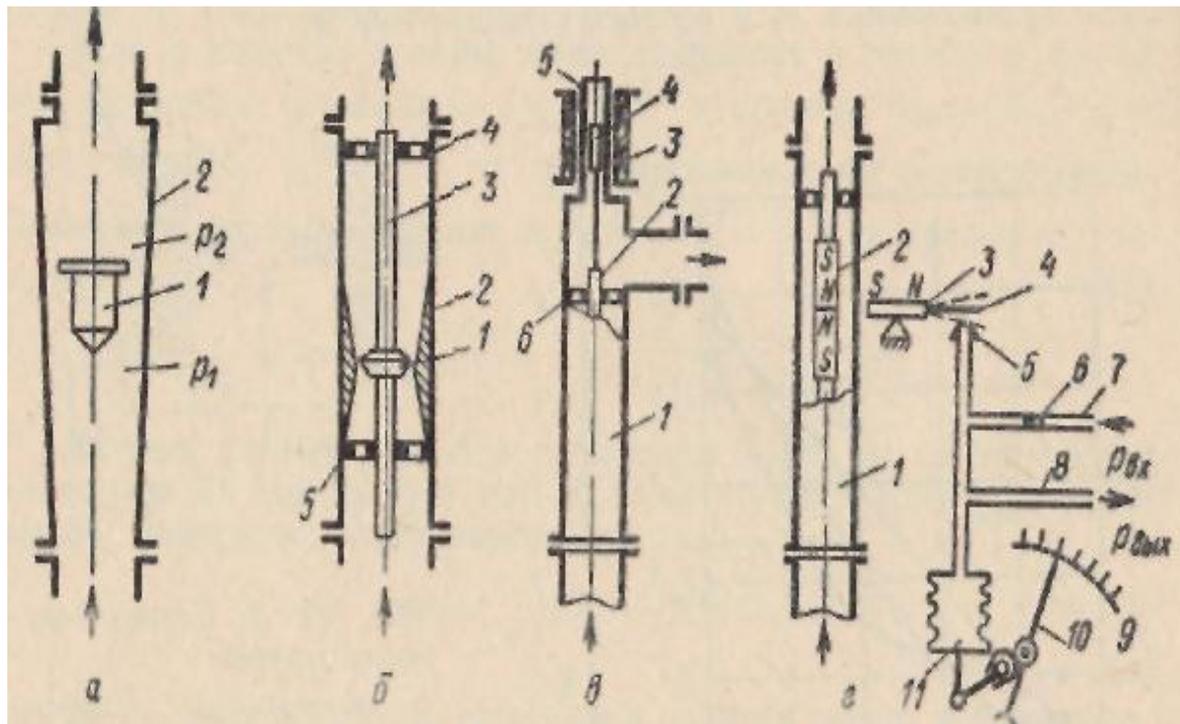
Если измеряется расход газа, то поправочный множитель на расширение ε может быть найден по формулам, приводимым для стандартных сопел.

При испытаниях сопел «четверть круга» при диаметрах труб от 12 до 50 мм и m в пределах 0,06—0,36 погрешность α не превышала $\pm 2\%$. Заметим, что изготовление сопел «четверть круга» представляет известные технологические трудности, так как допустимые отклонения от заданного профиля составляют около 10 мкм. Задний срез сопла должен быть тщательно отполирован.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ОБТЕКАНИЯ С ПОСТОЯННЫМ ПЕРЕПАДОМ ДАВЛЕНИЯ

Преобразователем обтекания называют средство измерения, в котором расход жидкости или газа преобразуется в перемещение поплавка (поршня, диска). При этом перепад давления на чувствительном элементе остается приблизительно постоянным. Преобразователи обтекания являются основой расходомеров, называемых ротаметрами.

Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления



Упрощенные схемы преобразователей обтекания:
а — со свободным поплавком; б — с
центрированным поплавком; в — с
электрическим дифференциальным
трансформатором; г — с пневматической
передачей

Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления

Поплавок 1 (рис., а) помещается в мерный конус 2, длина которого зависит от заданного перемещения. Если преобразователь предназначен для непосредственного отсчета расхода, то он выполняется в виде конусной стеклянной трубы, на поверхность которой наносят условные деления. Поплавок такого преобразователя свободный. Верхняя его часть — мидель, имеющая наибольшее поперечное сечение, образует кольцевой зазор со стенкой конуса.

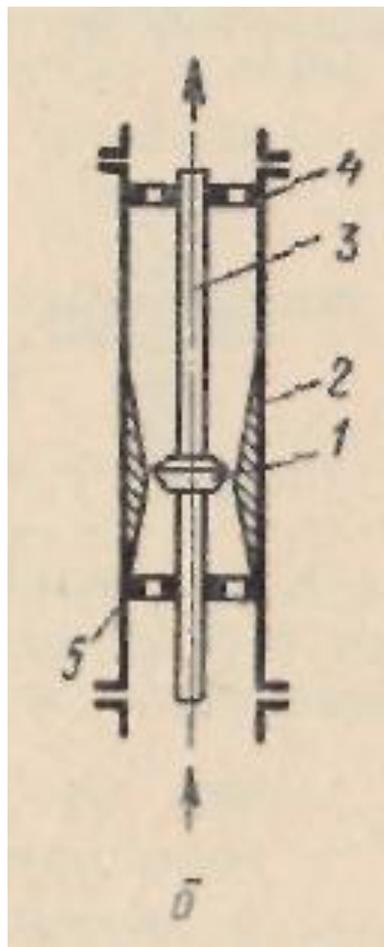
Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления

Поток жидкости или газа увлекает поплавок, поднимая его вверх. При перемещении вверх сила, создаваемая динамической составляющей перепада давления на носовую часть поплавка и зависящая от кольцевого зазора, превышает силу тяжести поплавка. Поплавок приходит в равновесие, когда эти силы уравновесятся. Ход поплавка в таких преобразователях составляет до 500 мм.

Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления

Из теории преобразователей обтекания следует, что перепад давления непосредственно на поплавке $\Delta p = p_1 - p_2$ с перемещением поплавка почти не меняется (точнее, несколько уменьшается). По этой причине такие преобразователи относят к приборам постоянного перепада давления.

Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления



В преобразователях, предназначенных для работы в электрических или пневматических системах, применяют центрированные поплавки или диски с малым ходом (рис., б). Поплавок 1, укрепленный на штоке 3, перемещается в мерном конусе 2. Шток центрируется в перфорированных направляющих 4 и 5.

Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления

Статическая функция преобразования может быть представлена в виде

$$\frac{x}{d} \left(1 + \frac{x}{d} \operatorname{tg} \frac{\Theta}{2} \right) = \frac{1}{\beta} \frac{V}{4 f \operatorname{tg}(\Theta/2) \sqrt{2 g l_{\text{п}} \chi}}$$

где x — перемещение поплавка; d — минимальный начальный диаметр конуса; Θ — угол конусности трубки; β — коэффициент, зависящий от формы поплавка и числа Re ; f — наибольшая площадь поплавка; $l_{\text{п}}$ — длина поплавка; $\chi = (\rho_{\text{п}}/\rho) - 1$, $\rho_{\text{п}}$ — плотность материала поплавка; ρ — плотность измеряемой среды.

Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления

Опыт показывает, что попытки практически использовать эту функцию для стандартизации расчета преобразователей обтекания **не** приводят к надежным результатам.

Поэтому общепринято преобразователи этого типа подвергать индивидуальной градуировке. Градуировку осуществляют, как правило, на воде или воздухе.

Результаты градуировок приводят в паспортах на конкретные средства измерений в виде таблиц и графиков.

Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления

При использовании преобразователей на средах, отличных от градуировочных, производят пересчет характеристик. Существует целый ряд методов пересчета характеристик.

Один из методов базируется на формуле

$$V = V_{гр} \sqrt{\frac{C_x (\rho_{п} - \rho) \rho_{гр}}{C_{хгр} (\rho_{п} - \rho_{гр}) \rho}}$$

где V — объемный расход измеряемой жидкости;
 $V_{гр}$ — объемный расход градуировочной жидкости; $\rho_{п}$, $\rho_{гр}$ и ρ — плотности соответственно материала поплавка, градуировочной и измеряемой жидкостей; $C_{хгр}$ и C_x — коэффициенты сопротивления поплавка при протекании градуировочной и измеряемой жидкостей.

Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления

Коэффициенты $C_{xгр}$ и C_x определяют для любого значения расхода по таблицам и формулам, приводимым в описаниях и паспортах конкретных приборов.

Для случаев, когда вязкости градуировочной и измеряемой жидкостей близки, отношение коэффициентов сопротивления $C_x/C_{xгр}$ мало отличается от единицы.

Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления

Тогда формула упрощается:

$$V = V_{\text{гр}} \sqrt{\frac{(\rho_{\text{п}} - \rho)\rho_{\text{гр}}}{(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{гр}})\rho}}$$

Преобразователи с малым ходом поплавка (см. рис., б) часто снабжаются устройствами для преобразования перемещения поплавка в электрический или пневматический сигнал. Поскольку в этом случае нет необходимости непосредственно наблюдать за поплавком, корпуса таких преобразователей изготавливают из металла, что позволяет значительно поднять рабочие давления.

Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления

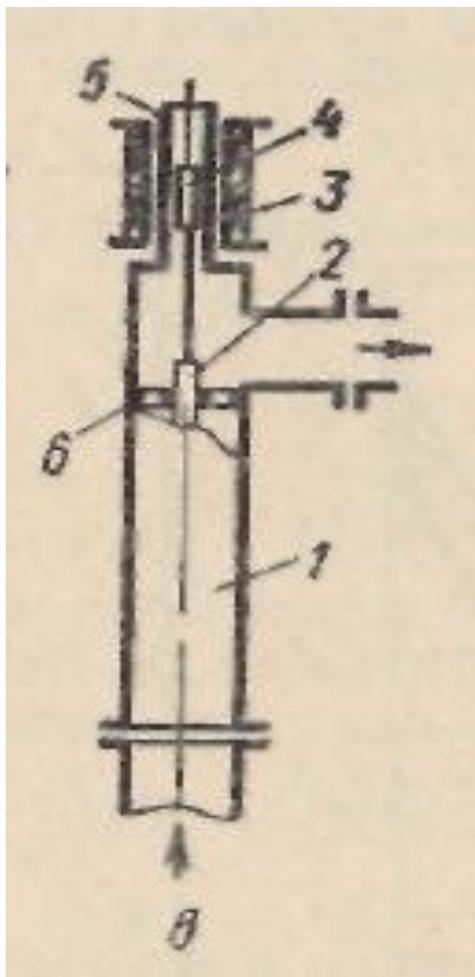


Схема электрического преобразователя обтекания. Центрированный поплавок находится в корпусе 1, в который снизу подводится измеряемая жидкость. Шток 2 поплавка центрируется направляющей 6. К штоку прикреплен ферромагнитный сердечник 4, находящийся внутри трубки 5 из немагнитного материала. На эту трубку снаружи надета катушка 3 дифференциального трансформатора (см. п. V.3.3).

Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления

Перемещение сердечника приводит к изменению величины и фазы напряжения на вторичной обмотке трансформатора. В комплекте с таким преобразователем работает вторичный прибор дифференциально-трансформаторной системы. Преобразователь, укомплектованный дифференциальным трансформатором, называется электрическим ротаметром.

Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления

В немагнитном корпусе 1 на штоке поплавка смонтирован блок из двух встречно направленных постоянных магнитов 2. В поле этих магнитов вне корпуса расположен следящий магнит 3, положение которого зависит от положения поплавка. С увеличением расхода (поплавок поднимается) следящий магнит поворачивается по часовой стрелке и опускает вниз заслонку 4. Последняя работает совместно с соплом 5: чем ближе заслонка подходит к соплу, тем большее сопротивление оказывается воздуху, вытекающему в атмосферу из сопла.

Преобразователи обтекания с постоянным перепадом давления

Сжатый воздух с давлением $p_{\text{ВХ}}$ подводится к штуцеру 7 и проходит через дроссель 6. Выходное управляющее давление $p_{\text{ВЫХ}}$ зависит от положения заслонки: оно тем выше, чем ближе заслонка подводится к соплу. Давление $p_{\text{ВЫХ}}$ выводится во внешнюю сеть через штуцер 8, а также действует на сильфон 11, который, растягиваясь, через передаточный механизм переворачивает указательную стрелку 10. С ее помощью расход непосредственно отсчитывается по шкале 9.

ТАХОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Тахометрическим называют преобразователь объемного расхода (скорости потока) в частоту вращения ротора, которая в свою очередь преобразуется в частоту следования электрических импульсов.

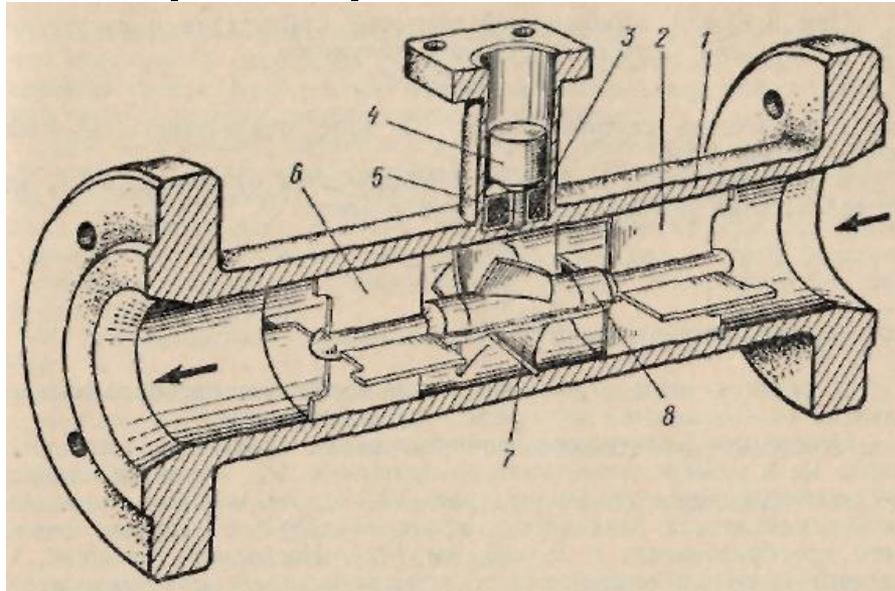
В зависимости от вида вращающегося элемента тахометрические преобразователи подразделяются на крыльчатые и шариковые.

Крыльчатые преобразователи

Такие преобразователи имеют ротор в виде осевой либо тангенциальной крыльчатки. В преобразователях с осевой крыльчаткой, или турбинных преобразователях, ось вращения ротора совпадает с направлением потока. В тангенциальных преобразователях ось вращения перпендикулярна направлению потока.

Крыльчатые преобразователи

Наибольшее распространение получил турбинный преобразователь.



Крыльчатый (турбинный) преобразователь расхода:

1—корпус; 2 — передняя направляющая; 3 — катушка датчика; 4 — постоянный магнит; 5 — сердечник; 6 — задняя направляющая; 7— крыльчатка; 8 — ступица

Крыльчатые преобразователи

Ротор представляет собой винтовую крыльчатку 7, изготовленную заодно со ступицей 8. Ось крыльчатки опирается на подшипники, расположенные во входной 2 и выходной 6 направляющих. Проточная часть преобразователя размещается внутри цилиндрического корпуса 1 с фланцами или другими приспособлениями для присоединения к трубопроводу. Вне корпуса размещается индуктивный датчик, состоящий из постоянного магнита 4, сердечника 5 и катушки 3. Крыльчатку (или концы крыльев) выполняют из ферромагнитного материала, а корпус — из немагнитного материала (коррозиестойкая сталь или цветной металл).

Крыльчатые преобразователи

При движении измеряемой жидкости (газа) крыльчатка вращается, в результате чего периодически m раз за 1 оборот (m — число крыльев) в поле датчика оказывается стальное крыло. Соответственно в катушке индуктируется m импульсов за 1 оборот. Частота импульсов f (Гц)

$$f = mn$$

где n — частота вращения ротора (об/с);
является выходной величиной преобразователя.

Крыльчатые преобразователи

В общем виде функция преобразования записывается в виде

$$f = AV$$

где A — параметр, зависящий от конструктивных характеристик преобразователя и свойств измеряемой среды.

При идеально выполненной винтовой крыльчатке и отсутствии других влияний частота следования импульсов

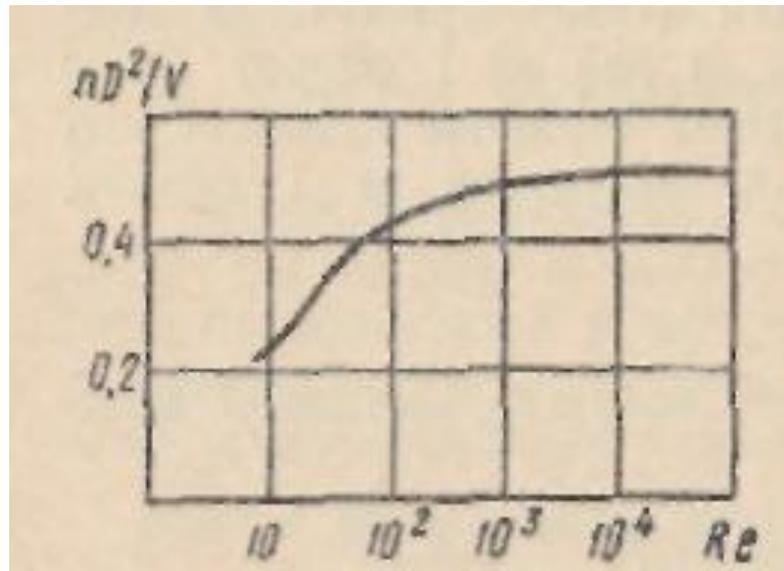
$$f = \frac{mV}{FH} (1 - s)$$

где F — площадь сечения потока в зоне крыльчатки; H — шаг винта крыльчатки.

В связи с этим стабильность характеристик преобразователей зависит от отклонений величины s от номинальной.

Основными величинами, влияющими на скольжение, являются число Re и момент сопротивления вращению M_c . Характер влияния Re иллюстрируется графиком, на котором приведена экспериментальная зависимость критерия nD^2/V от Re для реального преобразователя с $D = 25$ мм [42].

Крыльчатые преобразователи



Зависимость параметра nD^2/V от Re для крыльчатого преобразователя расхода

Крыльчатые преобразователи

Поскольку $D = \text{const}$, то данный критерий характеризует чувствительность преобразователя n/V . Видно, что при постоянном расходе увеличение вязкости среды, приводящее к уменьшению Re , вызывает заметное снижение чувствительности преобразователя при $Re < 10^3$.

Как и в других видах расходомеров, наряду с ограничением по вязкости число Re ограничивает и минимальный расход V_{min} , при котором еще обеспечиваются заданные точностные показатели.

Крыльчатые преобразователи

Существенное значение имеет момент сопротивления M_c . Основными элементами, которые могут вызвать изменение характеристик преобразователя, являются подшипники. Из схемы преобразователя видно, что подшипники воспринимают как радиальную, так и в большей степени осевую нагрузку, вызываемую осевой составляющей динамического давления жидкости на крылья. Поэтому при создании крыльчатых преобразователей большое внимание уделяется конструкции подшипников и их износостойкости.

Крыльчатые преобразователи

Наряду с применением более совершенных конструкций подшипников выпускаются преобразователи, в которые введены элементы, создающие осевые силы обратного направления и таким образом разгружающие упорные подшипники .

Крыльчатые преобразователи

Следует принимать во внимание, что только в самых крупных преобразователях ($D > 100 \div 50$ мм) применяются закрытые подшипники с принудительной смазкой. В остальных случаях применяемые подшипники скольжения работают без смазки либо смазываются измеряемой жидкостью. Подшипники склонны к загрязнению, которое может резко увеличить момент сопротивления. Загрязнение приводит также к ускоренному износу пары трения, появлению увеличенных зазоров и перекосов, что в свою очередь может вызвать касание ротора и корпуса.

Крыльчатые преобразователи

Сохранение метрологических характеристик требует повышенного внимания к условиям эксплуатации, особенно к чистоте измеряемой среды. Кроме того, преобразователи этого типа требуют достаточно коротких межповерочных интервалов.

Для обеспечения точности измерений крыльчатые преобразователи требуют, чтобы измерительный участок был изготовлен из труб с внутренним диаметром, равным внутреннему диаметру корпуса D . Длина измерительного участка до преобразователя должна быть не менее $10D$, после него — не менее $5D$. Переход от труб большего диаметра к измерительному участку должен осуществляться через конусные патрубки.

Крыльчатые преобразователи

К преимуществам крыльчатых преобразователей можно отнести:

- широкий диапазон диаметров трубопроводов (от 3—4 мм и даже меньше до 500 мм и более);
- широкий диапазон измерений; отношение V_{\max}/V_{\min} доходит до 10 и более;
- относительно высокую точность; даже у промышленных образцов погрешность составляет $\pm (0,5 \div 1,0) \%$

Крыльчатые преобразователи

Основные их недостатки следующие:

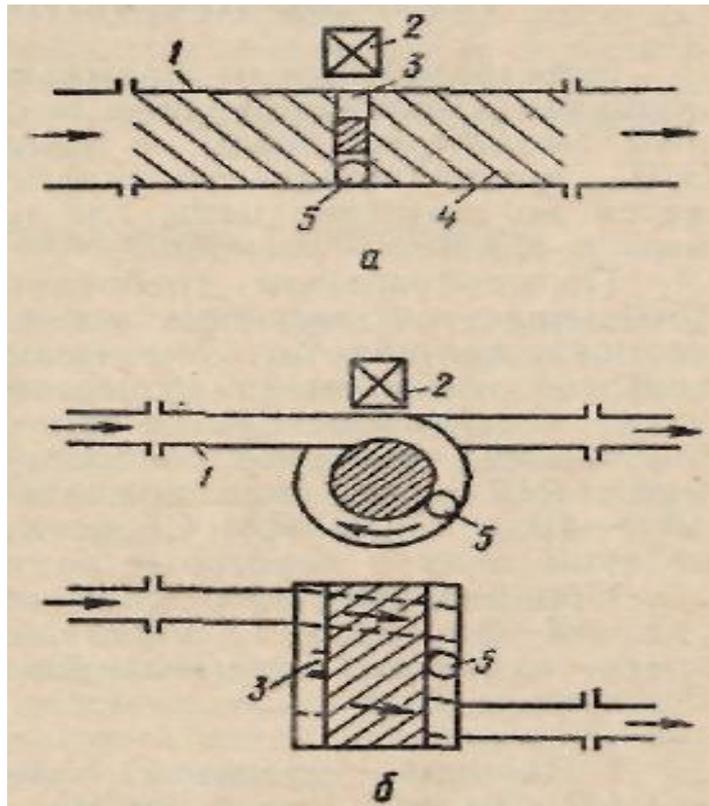
- невысокий ресурс (порядка 500 ч, в некоторых конструкциях выше);
- сравнительно высокая потеря давления, которая на максимальных расходах достигает до 0,02—0,03 МПа.

Шариковые преобразователи

Эти преобразователи обладают тем отличием, что роль ротора выполняет катящийся шарик, в результате чего в преобразователях такого типа опоры вообще отсутствуют. Шарик вращается в кольцевой камере, или лотке, куда подается измеряемый поток. Предварительно потоку придают вращательное движение.

Тангенциальная составляющая скорости приводит поток, проходящий через кольцевую камеру, во вращение. В результате поток увлекает с собой шарик. Частота вращения шарика в определенном диапазоне пропорциональна расходу.

Шариковые преобразователи



Схемы шариковых преобразователей расхода: а — с неподвижным направляющим аппаратом; б — со спиральной закруткой потока; 1 — корпус; 2 — электрический датчик; 3 — кольцевая камера; 4 — направляющий аппарат; 5 — шарик

Шариковые преобразователи

В преобразователе (рис., а) поток закручивается с помощью неподвижного направляющего аппарата 4.

Тангенциальная составляющая создает вращающийся поток в кольцевой камере 3 и заставляет вращаться шарик 5 в плоскости, перпендикулярной оси трубопровода. Преобразователи по этой схеме в основном используют для трубопроводов больших диаметров.

Шариковые преобразователи

Схема (рис., б) относится к преобразователю, в котором весь поток закручивается по спирали сверху вниз, охватывая при этом кольцевую камеру 3. Поток вращает шарик 5 в плоскости, параллельной оси трубопровода.

Шариковые преобразователи

В обоих случаях выходной сигнал в виде последовательности импульсов создается индуктивным или дифференциально-трансформаторным датчиком 2.

Для этого шарик должен быть изготовлен из ферромагнитного материала либо содержать такой материал. Корпус преобразователя изготавливают из немагнитного материала.

Экспериментальные исследования показывают значительное влияние вязкости и плотности измеряемой жидкости на характеристику преобразователя.

Так, при изменении плотности от 0,8 до 1,3 г/см³ и вязкости от 0,7 до 12 сСт изменение градуировки составило около 30%. Так же как и другие, шариковый преобразователь требует устройства прямолинейных участков до и после него по $(5 \div 10)D$.

Шариковые преобразователи

К достоинствам шариковых преобразователей относятся простота и надежность конструкции (вероятность безотказной работы за 2000 ч составляет 0,95—0,97), возможность измерять малые расходы (начиная от 0,01—0,025 м³/ч) в трубопроводах диаметром от 3 мм. При этом погрешность измерений в верхней половине диапазона измерений не превышает ±1,5%.

Основной недостаток — сравнительно высокая потеря давления (до 0,05 МПа при наибольшем расходе).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электромагнитным называют преобразователь, в котором движущаяся электропроводная жидкость взаимодействует с приложенным магнитным полем, в результате чего в жидкости наводится ЭДС, пропорциональная скорости потока. Наведенная ЭДС выводится во внешнюю цепь, где измеряется прибором, отградуированным в единицах расхода.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Принципиальным требованием для данного преобразователя является величина удельной электропроводности жидкости, которая должна быть не меньше $10^{-5}—10^{-3}$ См/м (Единица удельной электропроводности — сименс на метр (См/м). То же, что $1/\text{Ом} \cdot \text{м}.$)

Это обстоятельство накладывает существенные ограничения на применение таких преобразователей в холодильной технике. Удельная электропроводность наиболее распространенных холодильных агентов (аммиак, R12 и др.) при комнатных температурах лежит в пределах $10^{-5}—10^{-11}$ См/м. Следовательно, область применения включает лишь воду и некоторые растворы.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

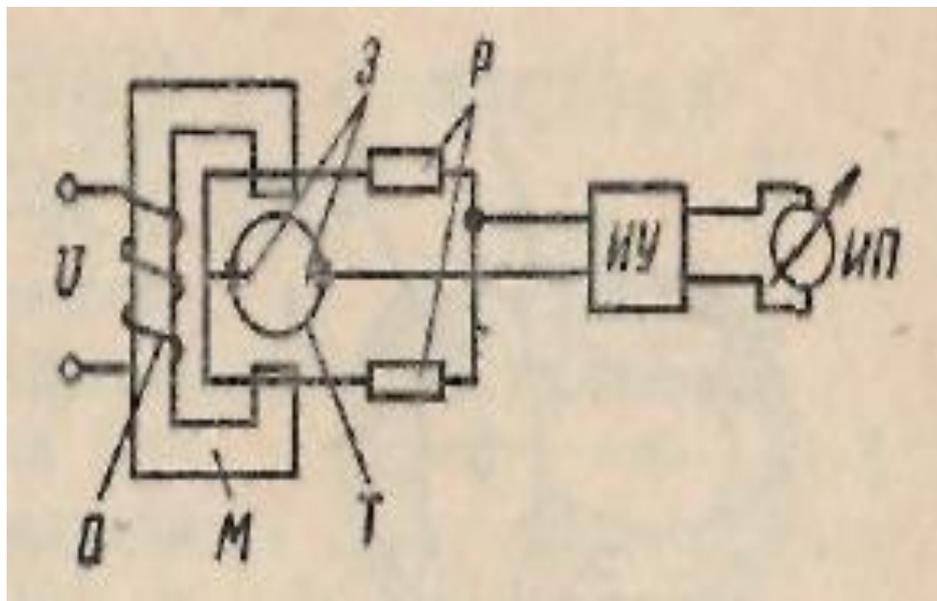


Схема электромагнитного преобразователя расхода

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Труба T , через которую протекает измеряемая жидкость, охвачена магнитопроводом M с обмоткой O , питаемой напряжением U .

Труба изготовлена из немагнитного материала (чаще всего коррозиестойкая сталь), в результате чего магнитный поток между полюсами магнитопровода пронизывает трубу и протекающую по ней жидкость.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В результате в жидкости наводится ЭДС, которая снимается изолированными электродами Э и отводится к измерительному устройству ИУ с измерительным прибором ИП. В схему включены резисторы Р, предназначенные для компенсации наводок, о соответствии с законом электромагнитной индукции наведенная ЭДС определяется из уравнения
$$e = kBwD$$

где k — коэффициент, зависящий от конструкции преобразователя; B — магнитная индукция; w — скорость потока; D — внутренний диаметр трубы

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Величина ЭДС не зависит от параметров контролируемой жидкости (вязкости, температуры, химического состава, плотности).

Питание электромагнита может осуществляться как постоянным, так и переменным током.

Преобразователи с питанием постоянным током более защищены от помех, однако подвержены поляризации электродов. Преобразователи переменного тока, наоборот, менее устойчивы к помехам, однако не подвержены поляризации.

Такие преобразователи получили преимущественное распространение.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электромагнитные преобразователи обладают рядом важных достоинств: малая потеря давления; широкий диапазон диаметров труб (от 10 до 1000 мм); широкий диапазон измерения расхода; возможность измерения расхода вязких, загрязненных и агрессивных сред.

Основные недостатки их: сравнительно невысокая точность (порядка 2—3%), ограниченная область измеряемых сред (жидкости с достаточной электропроводностью).

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ОБЪЕМНЫХ СЧЕТЧИКОВ

Преобразователи этого типа содержат вращающиеся элементы, отсекающие определенные объемы измеряемой среды и переводящие их от входного патрубка к выходному. Вращение измерительных элементов происходит под действием самой измеряемой среды. Число сделанных оборотов пропорционально объему жидкости, прошедшей через преобразователь. Известно несколько типов объемных преобразователей: овалльно-шестереночные, роторные, лопастные, кольцевые.

Преобразователи объемных счетчиков

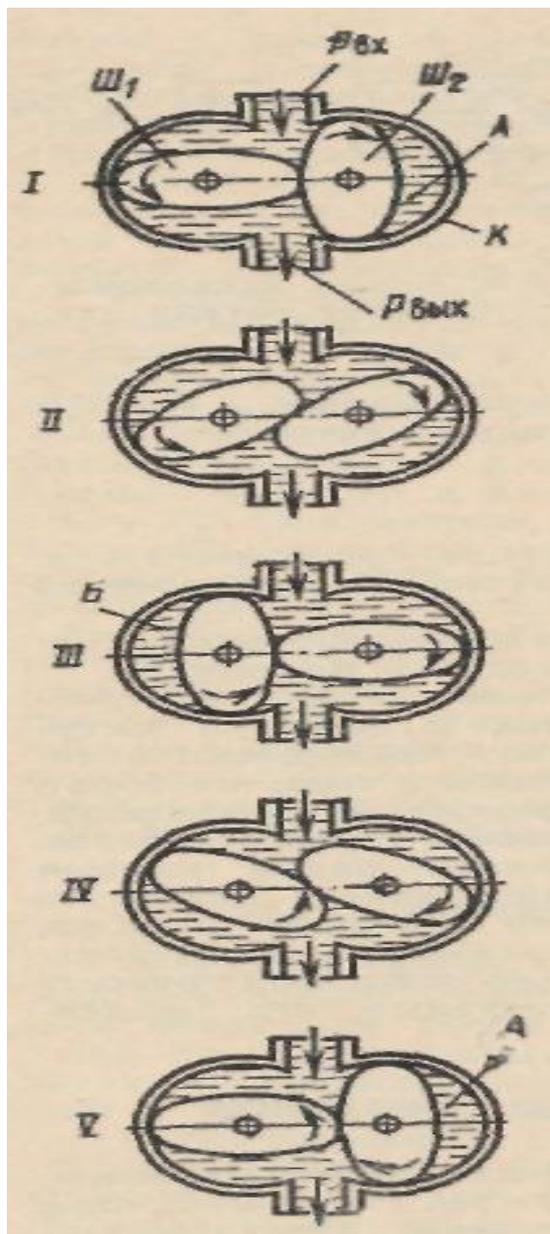


Схема преобразователя
объемного счетчика с
овальными
шестернями

Преобразователь состоит из камеры К с цилиндрическими боковыми поверхностями и плоскими торцами. В корпусе вращаются две овальные шестерни \mathbb{W}_1 и \mathbb{W}_2 , находящиеся в зацеплении. Измеряемая жидкость подводится к входу с давлением $p_{\text{вх}}$ и отводится от выхода с давлением $p_{\text{вых}}$, которое меньше входного на величину потери давления в преобразователе.

Основные фазы вращения шестерен показаны на рисунке. В фазе I шестерня \mathcal{W}_1 расположена горизонтально. Суммарный вращающийся момент на этой шестерне равен нулю, так как давления действуют симметрично по обе стороны от оси вращения. Шестерня \mathcal{W}_2 , расположенная вертикально, отсекает полость А мерного объема. Видно, что момент, развиваемый давлением $p_{\text{ВХ}}$ по часовой стрелке, больше момента от давления $p_{\text{ВЫХ}}$ (по условию $p_{\text{ВХ}} > p_{\text{ВЫХ}}$). В результате шестерня \mathcal{W}_2 как ведущая вращается по часовой стрелке, увлекая за собой как ведомую шестерню \mathcal{W}_1 .

Электромагнитные преобразователи

В промежуточной фазе II шестерни располагаются наклонно, объем А сообщен с выходным патрубком. В этом положении вращающие моменты приложены к обеим шестерням.

В фазе III шестерня Ш_1 отсекает полость Б и является ведущей, в то время как Ш_2 является ведомой.

В фазах IV—V процесс завершается половиной оборота, вращение продолжается.

Преобразователи объемных счетчиков

В течение каждого оборота имеет место переменный момент вращения, шестерни поочередно выполняют функции ведущей и ведомой.

За один полный оборот отсекается четыре мерных объема, которые в сумме равны объему измерительной камеры.

Одна из осей шестерен выводится из камеры и передает вращение счетному механизму, который представляет собой счетчик с несколькими разрядами.

Электромагнитные преобразователи

Торцевые поверхности шестерен и измерительной камеры должны образовывать достаточно малые зазоры, с тем чтобы избежать неучтенные перетечки жидкости.

Преобразователи объемных счетчиков

К достоинствам рассматриваемых преобразователей относятся: достаточно высокая точность измерений, допустимая погрешность составляет $\pm 0,5\%$; широкий диапазон температур измеряемой жидкости (приблизительно от -40 до $+50$ °С); широкий диапазон измерений, охватывающий количества от нескольких литров до сотен кубических метров в час; практическая независимость точности измерений от вязкости жидкости в пределах от $0,5$ до 300 сСт.

Электромагнитные преобразователи

Недостатками преобразователя являются: сравнительно высокая потеря давления, которая при максимальном расходе доходит до 0,05 МПа; чувствительность к загрязнениям, что требует обязательного применения фильтров.