

Государственный комитет РСФСР  
по делам науки и высшей школы

Самарский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева

А.Д.Арш А.Е.Жуковский А.Ф.Малеев

ИЗМЕРЕНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩИХ РАСХОДОВ  
РАБОЧЕГО ТЕЛА

Учебное пособие

Самара 1992

УДК 681.12

Измерение пульсирующих расходов рабочего тела: Учеб. пособие / А. Д. Арш, А. Е. Жуковский, А. Ф. Малеев; Самар. авиац. ин-т. Самара, 1992. 36 с.

ISBN 5-230-16913-3

Даны обзор существующих систем для измерения нестационарных расходов и газов и общая характеристика динамических свойств различных типов расходомеров. Описана методика проведения частотных испытаний расходомеров и проведен сравнительный анализ их динамических характеристик.

Пособие рекомендуется студентам специальностей 1302 и 1304, а также слушателям факультета повышения квалификации ИТР.

Выполнено на кафедре автоматических систем энергетических установок.

Ил. 13. Библиогр.: 3 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С. П. Королёва

Рецензент И. С. Загузов

ISBN 5-230-16913-3

© Самарский авиационный институт, 1992

## В В Е Д Е Н И Е

При исследовании динамических характеристик агрегатов и элементов гидроавтоматики возникает необходимость в измерении быстроменяющихся расходов жидкости. Для этого необходимо иметь расходомеры с известными и достаточно высокими динамическими характеристиками. В документации на выпускаемые промышленностью расходомеры сведения о динамических характеристиках отсутствуют. Требуется их расчетное или экспериментальное определение. Расчетные характеристики целесообразно уточнять при проведении специальных (частотных) испытаний используемых расходомеров выбранного типа.

Динамические погрешности системы измерения нестационарных расходов определяются способностью системы неискаженно передавать амплитудный и фазовый спектры закономерности изменения расхода. Характер динамических погрешностей и их величина зависят от следующих факторов:

к какому типу звеньев относится первичный преобразователь (датчик) системы измерения расхода;

какое измерение выполняется данной измерительной системой (непрерывное или дискретное).

Второй фактор не влияет на характер искажения, а лишь сужает границы применения расходомера.

Искажения, вносимые инерционным звеном в измерительный сигнал, определяются величиной его постоянной времени. Эти искажения приводят к уменьшению амплитуды быстрых изменений сигнала с соответствующими искажениями фазы.

Искажения, вносимые колебательным звеном, определяются тем, насколько близко частотный спектр измеряемого расхода приближается к собственной частоте колебательного звена. Эти искажения носят резонансный характер и могут приводить как к уменьшению, так и к увеличению амплитуды измеряемого сигнала.

В данной работе изложены результаты сравнительного исследования динамических характеристик нескольких типов расходомеров:

турбинный расходомер ДР-55-2;

ультразвуковой расходомер РУОФ-1;

расходомер обтекания с диафрагмой, укрепленной на упругом элементе, измеряющий расход по скоростному напору, ДПР-20;

расходомер с диафрагмой с малоинерционным датчиком перепада давления;

расходомер, измеряющий мгновенное значение пульсирующего расхода по инерционному перепаду давления на участке гладкой трубы.

По результатам исследования определены области применения указанных типов расходомеров для измерения нестационарных расходов.

## І. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РАСХОДОМЕРОВ

Структурные схемы большинства расходомеров, предназначенных для измерения нестационарных расходов, имеют три звена: чувствительный элемент, преобразователь-усилитель и регистрирующий прибор. Каждое звено имеет индивидуальную динамическую характеристику.

В таких системах поток непосредственно воздействует на чувствительный элемент датчика расхода. В схемах некоторых расходомеров (массовых, индукционных, тепловых) имеется еще четвертое звено - возбудитель промежуточного параметра. Он предназначен для формирования в протекающем веществе промежуточных измерительных параметров, которые в дальнейшем позволяют измерять скорость потока. В этом случае поток действует на чувствительный элемент при помощи промежуточного параметра.

Структурная схема системы измерения расхода показана на рис.І.І.



Р и с. І.І. Структурная схема измерения расхода: В - возбудитель промежуточного параметра; ЧЭ - чувствительный элемент; ПУ - преобразователь-усилитель; РП - регистрирующий прибор

Для повышения динамических качеств в схемах некоторых расходомеров применяется обратная связь, при помощи которой преобразователь-усилитель воздействует на возбудитель промежуточного параметра или на чувствительный элемент.

Непрерывное измерение нестационарных потоков может быть выполнено при помощи систем, в которых используются следующие принципы измерения:

1. Непрерывное создание в потоке промежуточного параметра, по измерению которого определяется скорость потока. К таким системам относятся индукционные расходомеры с постоянным магнитным полем (ионизационные расходомеры с постоянной ионизацией потока газа).

2. Непрерывное создание в потоке механического промежуточного параметра, величина которого пропорциональна массовому расходу. К системам, в которых используются инерционные свойства среды, относятся различные массовые расходомеры (с вращающимися роторами, гироскопические и т.д.).

3. Непрерывное создание в потоке теплового промежуточного параметра, по измерению которого определяется скорость потока. Мерой скорости потока здесь служит интенсивность переноса потоком тепловой энергии. Сюда относятся калориметрические расходомеры.

4. Внесение в измеряемый поток нагретого тела, тепловой баланс которого непрерывно изменяется в зависимости от скорости потока. К таким системам относятся термоанометры.

5. Внесение в поток тела, непрерывно воспринимающего скоростной напор движущейся среды (расходомеры типа ДПР-20).

6. Измерение мгновенных значений разности давлений на диафрагме или участке гладкой трубы с последующим перерасчетом в значения расхода на основе расчетных зависимостей или статических градуировочных характеристик.

Дискретное измерение нестационарных расходов может быть выполнено при помощи систем, в которых используются следующие принципы измерения:

1. Периодическое создание в потоке промежуточного электрического параметра (индукционные расходомеры с переменным магнитным полем).

2. Периодическое создание в потоке промежуточного параметра в виде ультразвуковых колебаний, переносимых потоком (ультразвуковые расходомеры).

3. Периодическое создание в потоке промежуточного механического параметра (массовые расходомеры с измерением вибрационного усилия Кариолиса и вибрационного гироскопического момента).

4. Периодическое создание в потоке промежуточного теплового параметра. К таким системам относятся калориметрические расходомеры с синусоидально изменяющейся температурой термоэлемента.

5. Внесение в поток малоинерционных крыльчаток, скорость вращения которых пропорциональна скорости измеряемого вещества. В таких системах измерение скорости вращения крыльчатки осуществляется дискретно по прохождению ее лопастей около соответствующего измерительного элемента.

6. Периодическое создание специальных "меток потока", по скорости перемещения которых определяется скорость среды.

Дискретное измерение нестационарного потока осуществляется также системами, в которых принцип измерения хотя и не дискретный, но используется несущая частота, создающая дискретность измерения.

Применение дискретных методов измерения нестационарных расходов приводит в общем случае к некоторому упрощению аппаратуры, но при этом происходит определенное снижение динамических качеств системы. Это снижение проявляется за счет дискретности измерительного сигнала.

Для правильного измерения расхода, изменяющегося с частотой  $f$  без какой-либо потери информации, необходимо дискретные измерения проводить с частотой не менее  $8-10 f$ .

## 2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.

### РАСЧЕТЫ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

#### 2.1. Тахометрический датчик расхода ДР-55-2

О с н о в н ы е   т е х н и ч е с к и е   д а н н ы е:

номинальный расход 2,5 л/с;

диапазон расходов 0,8-2,5 л/с;

номинальная частота выходного сигнала 250 Гц;

погрешность измерения в рабочем диапазоне расходов  $\pm 1\%$  от  $Q_{ном}$

Чувствительным элементом датчика является турбинка, вращающаяся в потоке жидкости. Скорость вращения турбинки измеряется магнитно-индукционным узлом, в котором генерируется сигнал переменного тока с частотой, пропорциональной объемному расходу жидкости. Крыльчатка является элементом, определяющим динамические свойства всего прибора. Ее движение описывается дифференциальным уравнением

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_g - \sum M_c,$$

- где  $\omega$  - угловая скорость вращения ротора;  
 $J$  - момент инерции ротора, включающий в себя момент инерции присоединенной массы жидкости;  
 $M_g$  - вращающий момент;  
 $\sum M_c$  - сумма моментов сил сопротивления, определяемых силой трения в подшипниках и вязким трением жидкости о поверхность лопаток.

Различными конструктивными мероприятиями трение уменьшают до весьма малых значений (гидродинамическая разгрузка опор, высокая частота обработки поверхности лопаток). Для упрощения задачи приближенно примем  $\sum M_c \approx 0$ . Кроме того, примем следующие допущения:

течение потока является плоским,

скорость потока по радиусу одинаковая,

лопатки имеют прямоугольную форму.

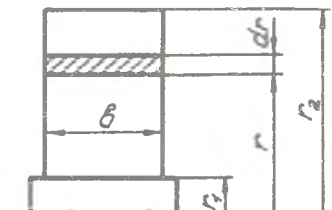
Определим вращающий момент  $M_g$ . Рассмотрим отдельную лопатку (рис.2.1). Выделим на ней элемент толщиной  $dr$  на произвольном радиусе  $r$ .

На рис. 2.2. представлены треугольнички скоростей для радиусов, близких к  $r_1$  (рис. 2.2,а) и  $r_2$  (рис.2.2,б) в установившемся режиме. На рисунках обозначены:

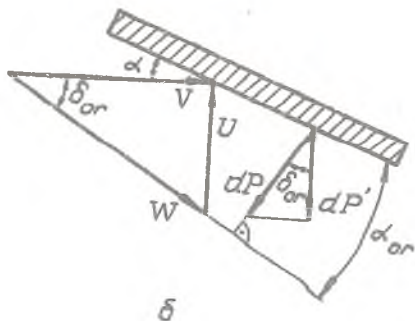
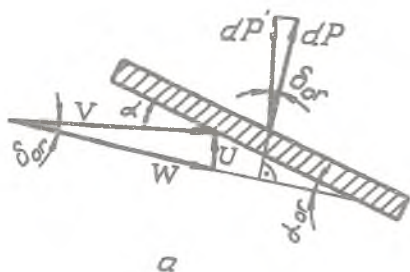
- $\alpha$  - угол установки лопатки по отношению к потоку жидкости (по радиусу не меняется);  
 $\alpha_{02}$  - эффективный угол атаки в установившемся потоке;  
 $\beta_{02}$  - угол между направлением потока и относительной скоростью в установившемся потоке;  
 $V$  - осевая скорость потока;  
 $U$  - окружная скорость крыльчатки;  
 $dP$  - подъемная сила элемента лопасти крыльчатки;  
 $\omega$  - угловая скорость.

При установившемся течении потока жидкости на элементы лопасти, находящиеся на разных радиусах, действует различная по величине и направлению подъемная сила: на радиусах, близких к  $r_1$ , подъемная сила имеет одно и то же направление с  $U$ , а на радиусах, близких к  $r_2$ ,  $dP$  направлена в сторону, противоположную окружной скорости. Следовательно, имеет место такой радиус  $r$ , на котором эле-





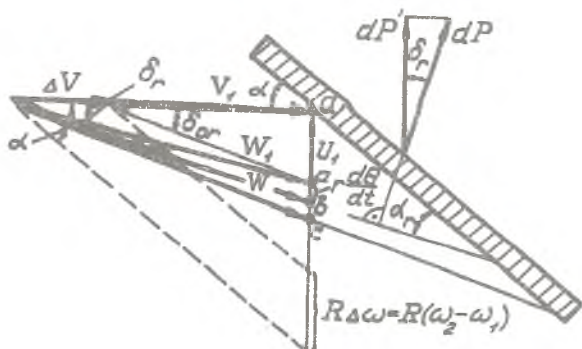
Р и с. 2.1. Схема лопатки турбины тахометрического датчика расхода



Р и с. 2.2. Треугольники скоростей на установившемся режиме: а - для радиусов, близких к  $r_1$ ; б - для радиусов, близких к  $r_2$

мент лопатки испытывает подъемную силу  $dP = 0$ , т.е. относительная скорость потока направлена параллельно лопатке. При установившемся течении суммарный крутящий момент, действующий на лопасть, равен нулю.

Рассмотрим случай неустановившегося течения жидкости. Пусть скорость  $V_1$  скачкообразно изменилась на величину  $\Delta V$  и приняла значение  $V_2 = V_1 + \Delta V$ . Будем рассматривать элемент лопасти на произвольном радиусе и деформацию треугольников скоростей во времени в этом сечении (рис. 2.3). Конец вектора относительной скорости  $W$  за вре-



Р и с. 2.3. Треугольники скоростей на неустановившемся режиме

мя переходного процесса (разгон крыльчатки) переместится из точки  $a$  в точку  $b$ , соответствующую новому установившемуся режиму с угловой скоростью  $\omega_2$ . В установившемся движении скорости  $V_1$  соответствует окружная скорость  $U_1 = r\omega_1$ , а скорости  $V_2$  соответствует  $U_2 = r\omega_2$ . Мгновенное значение окружной скорости будет определяться выражением

$$U = r\left(\omega_1 + \frac{d\theta}{dt}\right) \quad (2.1)$$

и изображаться вектором  $\delta d$  на рис. 2.3; скорость  $U_2$  изображается вектором  $cd$ .

Пунктирные линии, параллельные лопатке, показывают направление относительной скорости на радиусе  $R$  (где  $dP = 0$ ) в установившемся режиме при скоростях  $V_1$  и  $V_2$ .

Мгновенное значение подъемной силы, действующей на произвольный элемент крыльчатки, будет определяться

$$dP = c \frac{\rho W^2}{2} dS = c \frac{\rho \omega^2}{2} b dz, \quad (2.2)$$

где  $W$  - мгновенное значение относительной скорости потока,

$$W = \frac{V^2}{\cos \delta_z} \quad (2.3)$$

$c$  - коэффициент подъемной силы для лопасти крыльчатки.

Элементарный крутящий момент  $dM$ , создаваемый подъемной силой на элементе крыльчатки, равен

$$dM = dP \cos \delta_z z. \quad (2.4)$$

Коэффициент подъемной силы определяется выражением

$$c = \frac{2\pi b \sin \alpha_z}{1 + \frac{2z}{A}}, \quad (2.5)$$

где  $b = 0,9$  - коэффициент обтекания лопасти;  
 $A$  - характеристика лопасти крыльчатки,

$$A = \frac{(z_2 - z_1)^2}{S};$$

$S$  - площадь лопасти.

Подставляя (2.2), (2.3) и (2.5) в (2.4), получим

$$dM = \frac{2\pi b \sin \alpha_z}{1 + \frac{2z}{A}} \cdot \frac{\rho V_2^2 \cos \delta_z}{2 \cos^2 \delta_z} b dz = \frac{\pi b \rho b}{1 + \frac{2z}{A}} \cdot \frac{\rho V_2^2 \sin \alpha_z}{\cos \delta_z} z dz.$$

Обозначив  $\frac{\pi z \rho b}{1 + z^2/R^2} = K$  и подставляя  $\alpha_z = \alpha - \delta_z$ , после преобразований получим

$$dM = K V_2^2 \cos \alpha (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \delta_z) z dz, \quad (2.6)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R \omega_2}{V_2}, \quad (2.7)$$

$$\operatorname{tg} \delta_z = \frac{z(\omega_1 + \frac{d\theta}{dt})}{V_2}. \quad (2.8)$$

Подставляя (2.7) и (2.8) в (2.6), умножая на число лопастей  $N$  и проводя интегрирование, получим крутящий момент, действующий на крыльчатку в неустановившемся потоке:

$$\begin{aligned} M_g &= N K \cos \alpha V_2 \int_{z_1}^{z_2} [R \omega_2 - z(\omega_1 + \frac{d\theta}{dt})] z dz, \\ M_g &= N K \cos \alpha V_2 [R \omega_2 \frac{z_2^2 - z_1^2}{2} - (\omega_1 + \frac{d\theta}{dt}) \frac{z_2^3 - z_1^3}{3}] = \\ &= J \frac{d^2 \theta}{dt^2}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

где  $J$  - момент инерции крыльчатки;

$\frac{d^2 \theta}{dt^2}$  - угловое ускорение.

Уравнение (2.9) можно привести к виду

$$\begin{aligned} J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + N K \cos \alpha V_2 \frac{z_2^3 - z_1^3}{3} \frac{d\theta}{dt} &= N K \cos \alpha V_2 (R \omega_2 \frac{z_2^2 - z_1^2}{2} - \\ &- \omega_1 \frac{z_2^3 - z_1^3}{3}). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Радиус  $R$  определим из условия равенства нулю крутящего момента, действующего на лопатку в установившемся потоке. Для этого

Приравняем нулю правую часть уравнения (2.9), а в левой части  $\omega_2$  заменим на  $\omega_1$  и приравняем нулю  $\frac{d\theta}{dt}$ . Получим

$$R = \frac{2}{3} \frac{z_2^3 - z_1^3}{z_2^2 - z_1^2}. \quad (2.11)$$

Подставляя (2.11) в (2.10), получим

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + NK \cos \alpha V_2 \frac{z_2^3 - z_1^3}{3} \frac{d\theta}{dt} = NK \cos \alpha V_2 (\omega_2 - \omega_1) \frac{z_2^3 - z_1^3}{3}.$$

Поскольку  $\omega_2 - \omega_1 = \Delta \omega_{\beta x}$ , а  $\frac{d\theta}{dt} = \Delta \omega_{\beta \text{вих}}$ , то окончательно имеем

$$\frac{3J}{NK \cos \alpha V_2 (z_2^3 - z_1^3)} \frac{d \Delta \omega_{\beta \text{вих}}}{dt} + \Delta \omega_{\beta \text{вих}} = \Delta \omega_{\beta x}. \quad (2.12)$$

Уравнение (2.12) является дифференциальным уравнением аperiodического звена вида

$$(T_p + 1) \Delta \tilde{\omega}_{\beta \text{вих}} = K \Delta \tilde{\omega}_{\beta x},$$

где постоянная времени

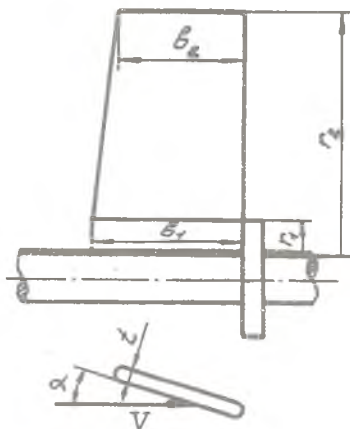
$$T = \frac{3J}{NK \cos \alpha V_2 (z_2^3 - z_1^3)} = \frac{3J\pi [z_2^2 - z_1^2]}{NK \cos \alpha Q_{cp} (z_2^3 - z_1^3)}, \quad (2.13)$$

а коэффициент усиления  $K = 1$ .

Как видно из уравнения (2.13), инерционность датчика уменьшается с уменьшением момента инерции крыльчатки, т.е. ее радиальных размеров и веса, и с увеличением числа лопаток и скорости потока.

Расчет постоянной времени датчика ДР-55-2

Исходные данные (рис. 2.4):



$$\begin{aligned} b_1 &= 0,65 \text{ см}, & b_2 &= 0,43 \text{ см}, \\ c &= 0,25 \text{ см}, & t &= 0,08 \text{ см}, \\ z_1 &= 0,45 \text{ см}, & z_2 &= 1,28 \text{ см}, \\ \alpha &= 45^\circ. \end{aligned}$$

Площадь лопатки  $S = b_{cp}(z_2 - z_1) = 0,45 \text{ см}$ , ширины подшипника  $b_n = 0,5 \text{ см}$ . Обозначим  $b'_1 = b_1 + c + b_n$ , тогда момент инерции

$$\begin{aligned} J &= J_{cm} + J_{пол} = 2\pi\rho b'_1 \int_{z=0}^{z_1} z^3 dz + \\ &+ N\rho b_{cp} t \int_{z_1}^{z_2} z^2 dz = 2\pi\rho b'_1 \frac{z_1^4}{4} + \end{aligned}$$

Рис. 2.4. Схема лопатки датчика ДР-55-2

$$+ N\rho b_{cp} t \frac{z_2^3 - z_1^3}{3} = 2,515 \text{ г/см},$$

$$A = \frac{(z_2 - z_1)^2}{S} = 1,535, \quad K = \frac{\pi^2 \rho b_{cp}}{1 + \frac{2z_1}{A}} = 0,58,$$

$$\tau = 5,15 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Расчетная частотная характеристика ДР-55-2 имеет вид

$$\Phi(i\omega) = \frac{1}{5,15 \cdot 10^{-3} i\omega + 1}.$$

## 2.2. Ультразвуковой расходомер РУОФ-1

Данный расходомер является опытным образцом, изготовленным Арзамасским приборостроительным заводом.

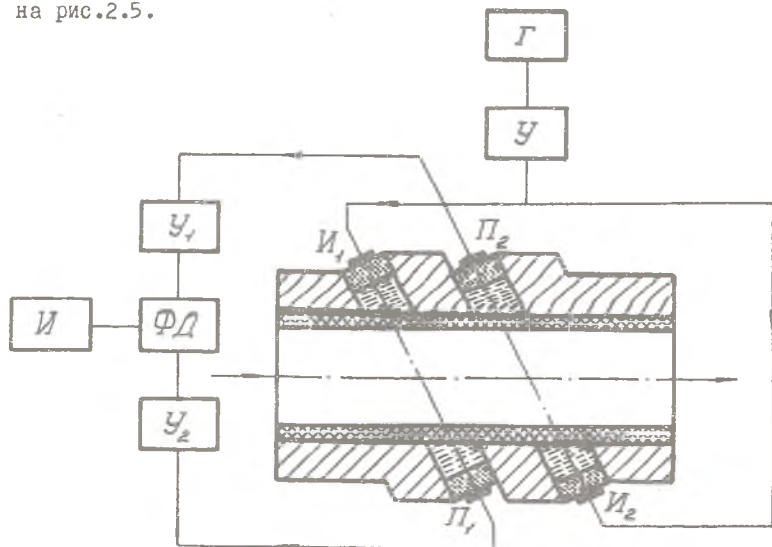
Ультразвуковой метод измерения расхода основан на явлении смещения звукового колебания движущейся средой. Время распространения колебания по направлению потока и против него на одной и той же базе различно и разница эта тем больше, чем больше скорость потока. Этот эффект реализуется в ультразвуковых расходомерах тремя методами:

методом измерения разности фазовых сдвигов двух ультразвуковых колебаний, направленных по потоку и против него;

методом измерения разности частот повторения коротких импульсов или пакетов ультразвуковых колебаний, направляемых одновременно по потоку и против него;

методом измерения разности времени прохождения импульсов, направляемых одновременно по потоку и против него.

В расходомерах для измерения переменных расходов, как правило, используется первый метод - фазовый, позволяющий измерять расходы, изменяющиеся с частотой в несколько тысяч герц. Расходомер РУОФ-1 является ультразвуковым фазовым расходомером. Блок-схема его показана на рис. 2.5.



Р и с. 2.5. Блок-схема ультразвукового расходомера

Генератор выдает синусоидальные колебания напряжения со стабилизированной частотой 1 МГц, которые, пройдя усилитель мощности, непрерывно поступают на излучающие пьезоэлементы  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ , проходят через звукопроводы, заполненные водно-спиртовым раствором, футеровку из пластмассы с малым коэффициентом поглощения, жидкость и через приемные звукопроводы поступают на приемные пьезоэлементы  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , образуя на последних синусоидальные напряжения, разность фаз между которыми пропорциональна скорости потока.

Каждый из пьезоэлементов связан со своим усилителем  $У_1$  и  $У_2$ . Выход обоих усилителей связан со схемой фазового детектора ФД, в котором оба сравниваемые по фазе напряжения складываются. Результирующее напряжение детектируется и поступает к стрелочному прибору или через согласующее устройство на шлейфовый осциллограф.

Выведем формулу, связывающую скорость потока с разностью фаз. Время распространения колебаний по направлению скорости

$$\tau_1 = \frac{L}{c + V'} = \frac{L}{c} \frac{1}{1 + \frac{V'}{c}},$$

время распространения колебаний против скорости

$$\tau_2 = \frac{L}{c - V'} = \frac{L}{c} \frac{1}{1 - \frac{V'}{c}},$$

где  $c$  - скорость звука в данной среде;

$V'$  - проекция скорости на акустическую ось.

Тогда разность времени

$$\Delta \tau = \tau_2 - \tau_1 = \frac{L}{c} \left( \frac{1 + \frac{V'}{c} - 1 + \frac{V'}{c}}{1 - \frac{(V')^2}{c^2}} \right),$$

где величиной  $\frac{(V')^2}{c^2}$  можно пренебречь, т.к.  $V = 5 - 10$  м/с, а  $c \approx 1000 - 1500$  м/с, тогда получим

$$\Delta \tau \approx \frac{2LV'}{c^2}.$$



Измеряемая разность фаз зависит от периода (частоты) колебаний и от  $\Delta \tau$  :

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{T} \Delta \tau = \omega \Delta \tau = \frac{2L V'}{c^2} \omega ,$$

где  $\omega$  - круговая частота колебаний.

Так как ось пьезоэлементов направлена под углом  $\alpha$  к оси трубы, то, переходя к осевой скорости потока, получим

$$\Delta \varphi = \frac{2L V \cos \alpha}{c^2} \omega .$$

Как видно из формулы, показания фазового расходомера зависят от скорости звука. Изменение температуры и давления жидкости вызывает изменение скорости звука в соответствии с эмпирическим выражением.

Статическая градуировочная характеристика расходомера аппроксимируется уравнением прямой со средней квадратичной погрешностью  $\sigma = 2\%$ .

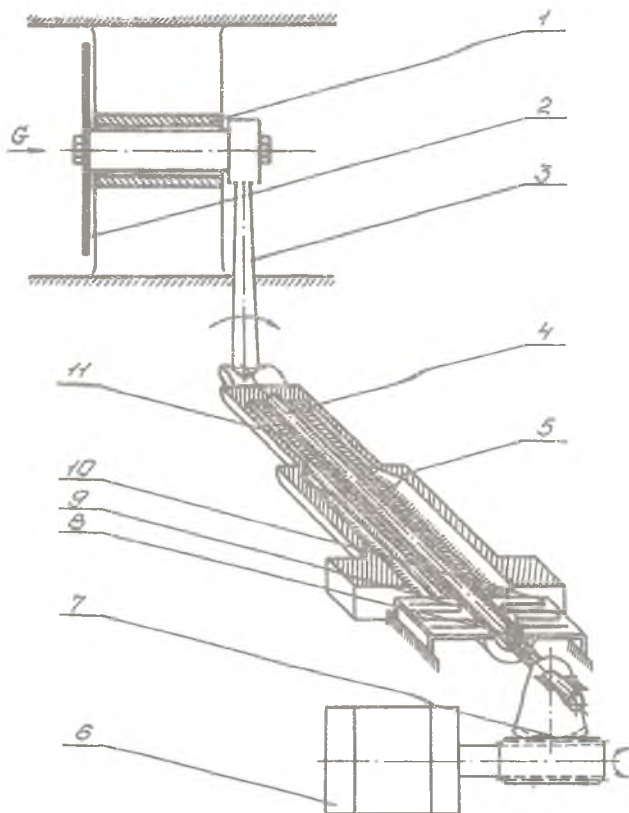
Погрешности, связанные с изменением профиля скоростей, с влиянием реверберации, погрешности, вносимые электронной схемой, частично учитываются градуировкой.

Высокая частота ультразвуковых колебаний (1 МГц), отсутствие инерционных элементов в первичном преобразователе и электронной схеме, "фазовый метод" измерения обеспечивают расходомеру высокие динамические свойства.

В исследуемом диапазоне частот колебаний расхода жидкости (до 1000 Гц) РУОФ-1 измерит переменный расход без динамических искажений.

### 2.3. Датчик пульсаций расхода Д1Р-20

Принцип действия датчика основан на измерении скоростного напора, действующего на диафрагму, введенную в поток жидкости. На рис.2.6 представлена конструктивная схема Д1Р. датчик состоит из корпуса 1, диафрагмы 2, рычага 3, вала 4 с наклеенными на него проволочными тен-



Р и с. 2.6. Конструктивная схема датчика пульсаций расхода

зометрами 8, втулки II, на конце которой располагаются упругие элементы 10 с наклеенными на них тензодатчиками 9, чувствительного элемента - торсиона 5, редуктора 7 и реверсивного двигателя 6.

Сигналы с тензодатчиков 9 и 8 подаются на два измерительных канала тензостанции ЛХ-7000. Один из каналов станции используется для регистрации среднего значения расхода  $G$ , другой - для регистрации пульсаций расхода  $G_c$ .

При прохождении через датчик жидкости с расходом  $Q$  на диафрагме возникает усилие, которое через рычаг 3 скручивает торсион 5, что фиксируется тензомерами 8. Полученный на выходе прибора ток вызывает срабатывание реле, запускающих двигатель 6. При этом в зависимости от направления тока двигатель через редуктор 7 создает на валу 4 момент, противоположный моменту, вызванному расходом  $Q$ . Когда эти моменты уравновесятся, чувствительная система датчика вернется в исходное положение и реле выключит двигатель 6.

Таким образом, компенсирующий момент однозначно связан с постоянной составляющей расхода. Его значение регистрируется с помощью тензометров 8, изменение сопротивления которых пропорционально закручивающему моменту.

При наличии пульсаций расхода на чувствительный узел датчика ДПР действует усилие, создаваемое постоянной составляющей расхода и компенсируемое системой обратной связи датчика, и переменное усилие, создаваемое пульсирующей составляющей. В силу своей инерционности система компенсации не может его скомпенсировать и оно полностью воспринимается упругой системой (торсион 5, трубка II, пластинка IO), рассчитанной только на усилие, создаваемое переменной составляющей расхода.

Возникающие при этом напряжения на пластинках, однозначно связанные с пульсирующей составляющей расхода, фиксируются тензомерами 9. Сигналы с них через тензостанцию ДХ-7000 подаются на систему регистрации (шлейфовый осциллограф).

При возникновении перегрузочных усилий диафрагма ложится на упор, предохраняя упругую систему датчика от разрушения.

При работе на низких частотах (примерно до 5 Гц) обратная связь успевает все же воздействовать на сигналы, получаемые с тензометров 9, внося искажения по амплитуде и фазе переменной составляющей расхода. В связи с этим при частотных испытаниях расходомеров обратная связь отключалась после выхода на установившийся режим.

Основные технические данные ДПР-20:

номинальный расход 0,6-1,5 л/с;

максимальная амплитуда колебаний 10% от  $Q_{ном}$ ;

перепад давлений на номинальном расходе 0,03-0,05 МПа;

диапазон измеряемых частот 0-50 Гц;

время отработки системы компенсации при изменении расхода от нуля до  $Q_{ном}$  примерно 8 с.

#### 2.4. Метод измерения мгновенного значения пульсирующего расхода по инерционному перепаду давления на участке гладкой трубы

Основой метода служат известные выражения, связывающие амплитуды колебаний скорости и давления в наполненном жидкостью трубопроводе, полученные из теории четырехполюсников [3]:

$$\tilde{P}_0 = \tilde{P}_\ell \operatorname{ch} \gamma \ell + \frac{\rho c}{S} \tilde{Q}_\ell \operatorname{sh} \gamma \ell, \quad (2.14)$$

$$\tilde{Q}_0 = \frac{\tilde{P}_\ell}{\rho c} \operatorname{sh} \gamma \ell + \tilde{Q}_\ell \operatorname{ch} \gamma \ell, \quad (2.15)$$

где  $\tilde{Q}_0, \tilde{Q}_\ell$  — амплитуды колебаний объемной скорости в начале (0) и в конце ( $\ell$ ) отрезка трубопровода;

$\tilde{P}_0, \tilde{P}_\ell$  — амплитуды колебаний давления в начале и в конце трубопровода;

$\rho$  — плотность жидкости;

$c$  — скорость распространения звука в жидкости;

$S$  — площадь поперечного сечения трубопровода;

$\gamma = \beta + j\alpha$  — постоянная распространения волнового процесса;

$\beta$  — коэффициент затухания колебаний (на длине  $\ell$  амплитуда колебаний ослабевает в  $e^{-\beta \ell}$  раз);

$\alpha = \frac{\omega}{c}$  — волновое число;

$\omega$  — угловая частота.

Как видно из формул, для определения скорости (расхода) необходимо в общем случае знать граничные условия на другом конце трубопровода. Покажем, что измерение пульсирующего расхода может быть проведено путем измерения перепада давления на отрезке гладкой трубы. На рис. 2.7 представлены схема измерительного участка и схемы эквивалентных четырехполюсников.

Четырехполюсники обратимы и симметричны, что характеризуется соотношениями

$$A = D, \quad AD - BC = 1. \quad (2.16)$$

Приняв направление скорости на рис.2.7 за положительное, запишем для отрезков трубы 0-1 и 1- $\ell$  выражения, связывающие скорость и давление на входе в отрезок трубы с теми же параметрами на выходе:

$$\tilde{p}_0 = A_1 \tilde{p}_1 + B_1 \tilde{Q}_1, \quad (2.17)$$

$$Q_0 = C_1 \tilde{p}_1 + D_1 \tilde{Q}_1, \quad (2.18)$$

$$\tilde{p}_1 = A_1 \tilde{p}_\ell + B_1 \tilde{Q}_\ell, \quad (2.19)$$

$$\tilde{Q}_1 = C_1 \tilde{p}_\ell + D_1 \tilde{Q}_\ell, \quad (2.20)$$

где  $A_1 = D_1 = ch \gamma \frac{\ell}{2}$ ;

$$B_1 = \frac{\rho c}{S} sh \gamma \frac{\ell}{2};$$

$$C_1 = \frac{S}{\rho c} sh \gamma \frac{\ell}{2}.$$

Из уравнений (2.19) и (2.20) получим

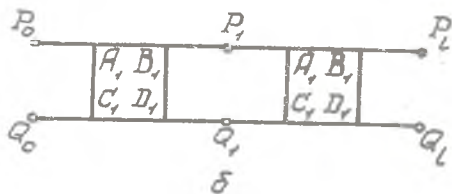
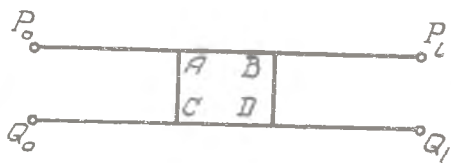
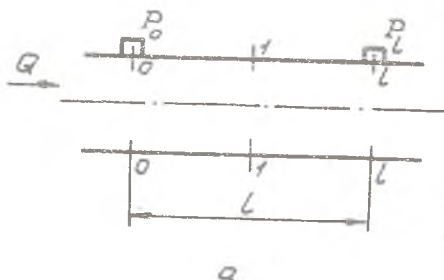
$$\tilde{p}_\ell = \frac{\tilde{p}_1 D_1 - \tilde{Q}_1 B_1}{A_1 D_1 - C_1 B_1},$$

$$\tilde{Q}_\ell = \frac{-C_1 \tilde{p}_1 + A_1 \tilde{Q}_1}{A_1 D_1 - B_1 C_1}$$

или с учетом уравнения (2.16)

$$\tilde{p}_\ell = \tilde{p}_1 D_1 - \tilde{Q}_1 B_1, \quad (2.21)$$

$$\tilde{Q}_\ell = -C_1 \tilde{p}_1 + A_1 \tilde{Q}_1. \quad (2.22)$$



Р и с.2.7.Измерение пульсирующего расхода по перепаду давления на участке гладкой трубы: а - схема измерительного участка; б - схемы эквивалентного участка

Вычитая (2.17) из (2.21) и учитывая равенство  $A_r = D_r$ , получим

$$\tilde{p}_0 - \tilde{p}_\ell = 2 B_1 \tilde{Q}_1$$

или окончательно

$$\Delta \tilde{p} = 2 \frac{\rho c}{s} \operatorname{sh} \gamma \frac{\ell}{2} \tilde{Q}_1. \quad (2.23)$$

Уравнение (2.23) связывает амплитуды расхода и перепада давлений, здесь  $\tilde{Q}_1$  - расход в середине отрезка.

Для определения расхода в сечении 0 нужно решить совместно уравнения (2.18) и (2.23), а для сечения  $\ell$  уравнения (2.22) и (2.23). Получим

$$\tilde{Q}_0 = \frac{s}{\rho c} \operatorname{sh} \gamma \frac{\ell}{2} \tilde{p}_1 + \operatorname{ch} \gamma \frac{\ell}{2} \frac{\Delta \tilde{p}}{2 \rho \frac{c}{s} \operatorname{sh} \gamma \frac{\ell}{2}}, \quad (2.24)$$

$$\tilde{Q}_\ell = -\frac{s}{\rho c} \operatorname{sh} \gamma \frac{\ell}{2} \tilde{p}_1 + \operatorname{ch} \gamma \frac{\ell}{2} \frac{\Delta \tilde{p}}{2 \rho \frac{c}{s} \operatorname{sh} \gamma \frac{\ell}{2}}. \quad (2.25)$$

Для коротких прямолинейных отрезков гидравлически гладких труб потерями на трение (коэффициентом  $\beta$ ) можно пренебречь и перейти в уравнениях (2.23), (2.24) и (2.25) от гиперболических функций к тригонометрическим:

$$\Delta \tilde{p} = 2i \frac{\rho c}{s} \sin \frac{\omega \ell}{2c} \tilde{Q}_1, \quad (2.26)$$

$$\tilde{Q}_1 = \frac{\Delta \tilde{p}}{2i \frac{\rho c}{s} \sin \frac{\omega \ell}{2c}}, \quad (2.27)$$

$$\tilde{Q}_0 = i \frac{s}{\rho c} \sin \frac{\omega \ell}{2c} \tilde{p}_1 + \cos \frac{\omega \ell}{2c} \frac{\Delta \tilde{p}}{i 2 \frac{\rho c}{s} \sin \frac{\omega \ell}{2c}}, \quad (2.28)$$

$$\tilde{Q}_\ell = -i \frac{s}{\rho c} \sin \frac{\omega \ell}{2c} \tilde{p}_1 + \cos \frac{\omega \ell}{2c} \frac{\Delta \tilde{p}}{i 2 \frac{\rho c}{s} \sin \frac{\omega \ell}{2c}}. \quad (2.29)$$

При соблюдении условия  $\frac{\omega l}{2c} < 0,5$  с достаточно высокой степенью точности синус в уравнениях (2.26) - (2.29) можно заменить аргументом. Тогда будем иметь

$$\Delta \tilde{p} = i \frac{\rho \omega l}{s} \tilde{Q}_1, \quad (2.30)$$

$$\tilde{Q}_1 = -i \frac{s}{\rho \omega l} \Delta \tilde{p}, \quad (2.31)$$

$$\tilde{Q}_0 = i \frac{s \omega l}{2 \rho c^2} \tilde{p}_1 + \frac{s}{i \rho \omega l} \cos \frac{\omega l}{2c} \Delta \tilde{p}, \quad (2.32)$$

$$\tilde{Q}_l = -i \frac{s \omega l}{2 \rho c^2} \tilde{p}_1 + \frac{s}{i \rho \omega l} \cos \frac{\omega l}{2c} \Delta \tilde{p}. \quad (2.33)$$

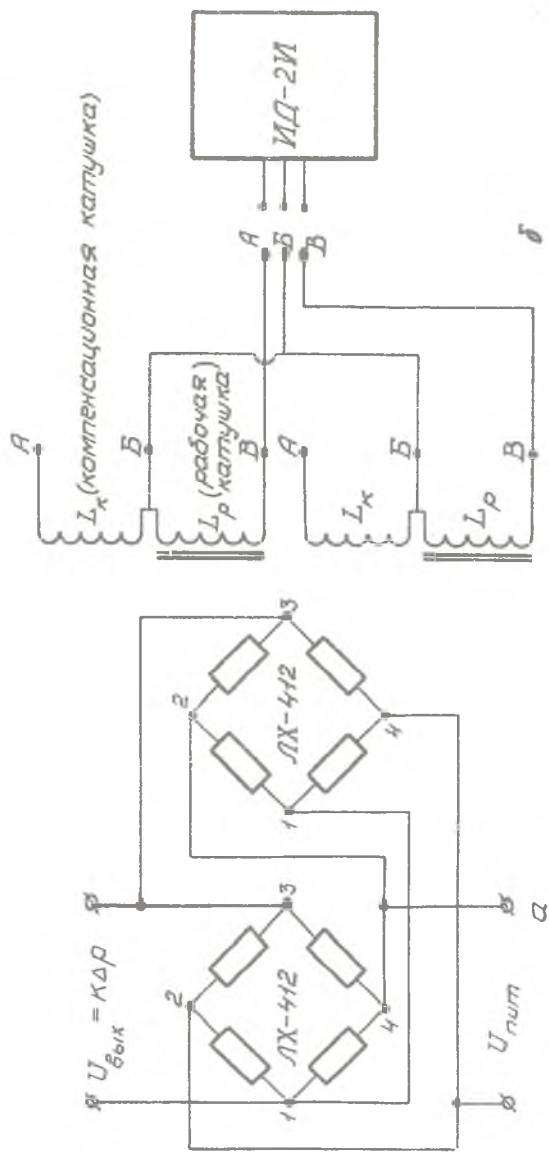
Выражения (2.30) и (2.31) совпадают с выражениями, связывающими переменный расход с инерционным перепадом давлений, справедливыми для столба несжимаемой жидкости.

Таким образом, измерение переменного расхода в трубопроводе можно реализовать, измеряя перепад давления на отрезке трубы и давление в середине отрезка. Для определения переменного расхода в середине отрезка достаточно измерить перепад давления. Для измерения переменного расхода в начале отрезка трубопровода, другой конец которого акустически открыт, достаточно измерить лишь одно давление в начале отрезка. Соответствующая формула получается из уравнений (2.14) и (2.15) при  $\tilde{p}_l = 0$ :

$$\tilde{Q}_0 = \frac{\tilde{p}_0}{\rho c} \operatorname{ctg} \gamma l.$$

Для измерения перепада давления используется датчик ЛХ-412 или аналогичный ему датчик ПЛХ, составленный из двух идентичных тензодатчиков типа ЛХ-412, электрически соединенных по схеме вычитания сигналов (рис.2.8,а). Аналогичным способом (используя схему вычитания сигналов) можно сформировать преобразователь перепада давления из датчиков типа ДД-10 (рис.2.8,б).

Применение описанного метода измерения расхода имеет ограничение, обусловленное тем, что в основе его лежат линеаризованные уравнения течения жидкости, справедливые при амплитудах пульсаций, малых по срав-



Р и с. 2.8. Соединение датчиков давления по схеме вычитания сигналов: а — датчики давления ЛХ-412; б — датчики давления ИД-10



нению со средней величиной расхода. При экспериментальной проверке определенная этим методом амплитуда пульсаций расхода отличалась от замеренной ультразвуковым расходомером на 25-30% в диапазоне частот до 500 Гц. Погрешность измерения амплитуды перепада давления в этом частотном диапазоне составляла 8-10%.

Описанный метод пригоден для качественной оценки переменной составляющей расхода, но может быть удобен в случаях, когда установка в гидравлическую систему специальных датчиков расхода не представляется возможной.

## 2.5. Сужающее устройство с датчиком перепада давления

Сужающие устройства нашли широкое применение для измерения расхода при установившемся течении жидкости. В качестве измерителей перепада при этом чаще всего используются ртутные дифманометры.

Применение сужающих устройств для измерения пульсирующего расхода имеет ряд важных особенностей, которые состоят в следующем:

1. Нет однозначной связи между амплитудами расхода и перепада давлений на сужающем устройстве. Кроме амплитуды расхода на амплитуду перепада давления влияют: частота пульсаций, величина среднего расхода и соотношение между переменной и постоянной составляющей расхода. Влияние частоты пульсаций связано с появлением реактивного сопротивления столба жидкости в сужающем устройстве. Среди различных типов сужающих устройств это влияние в наименьшей степени проявляется в диафрагмах.

2. Для измерения пульсирующего расхода необходимо иметь безынерционный измеритель перепада давления. На сегодняшний день этому условию лучше всего удовлетворяют датчики перепада ЛХ-405 или датчик ПЛХ-4Г2, представляющий собой комбинацию двух тензометрических датчиков давления ЛХ-4Г2 с идентичными характеристиками, включенных по схеме вычитания электрических сигналов. Датчики устанавливаются заподлицо со стенками трубопровода в непосредственной близости от стенок сужающего устройства.

3. Расчетные зависимости, связывающие амплитуды расхода и перепада давления на диафрагме, предполагают постоянство коэффициента расхода сужающего устройства. Дестабилизирующими факторами для коэффициента расхода являются кавитация при недостаточном противодавлении и винтовое течение на входе сужающего устройства и выходе из него.

Для исключения первого фактора давление на выходе необходимо иметь в 2-3 раза большим, чем максимальный перепад давления на сужающем устройстве.

Внешнее винтовое движение жидкости перед диафрагмой возникает при соответствующей конфигурации трубопроводов и недостаточной длине прямолинейного участка перед ней, оно приводит к увеличению коэффициента расхода до 30%. Устраняется внешнее винтовое движение установкой крестообразного струевыпрямителя длиной примерно  $4d$  на входе в диафрагму. На выходе из диафрагмы имеет место внутреннее винтовое течение нестационарного характера. Одним из факторов, влияющих на формирование внутреннего винтового потока, является пульсирующее течение жидкости, а следствием является изменение коэффициента расхода.

Стабилизации коэффициента расхода удается добиться установкой струевыпрямителя на выходе из диафрагмы.

Диафрагмы с датчиками перепада давления для измерения пульсирующего расхода показаны на рис. 2.9.

Комплексные амплитуды колебаний расхода и перепада давления на диафрагме связаны соотношением

$$\delta \Delta p = \delta Q Z, \quad (2.34)$$

где  $\delta \Delta p$  - комплексная амплитуда колебаний перепада давления;

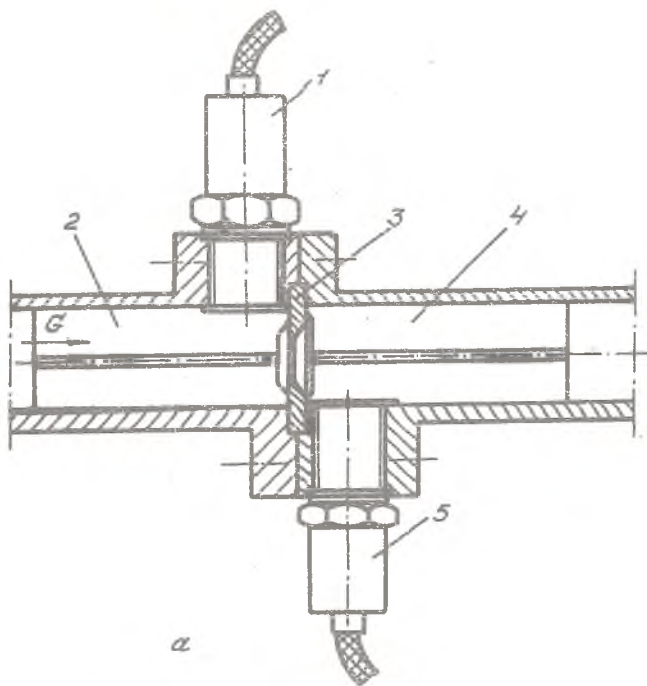
$\delta Q$  - комплексная амплитуда колебаний расхода;

$Z$  - акустический импеданс диафрагмы, характеризующий комплексное сопротивление диафрагмы в пульсирующем потоке,

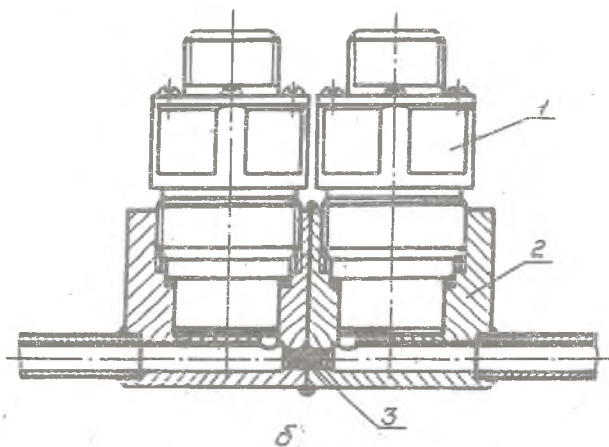
$$Z = R_{\text{вз}} + i J \omega Z. \quad (2.35)$$

Действительная часть импеданса, связанная с потерями энергии на трение, определяется как тангенс угла наклона касательной к статической характеристике диафрагмы  $p = f(Q)$  в точке  $Q_{\text{ср}}$ :

$$p = \kappa Q^2, \quad R_{\text{вз}} = \left( \frac{d \Delta p}{d Q} \right)_{Q_{\text{ср}}} = \tan \alpha = 2 \kappa Q_{\text{ср}} = \frac{2 \Delta p_{\text{ср}}}{Q_{\text{ср}}}. \quad (2.36)$$



Р и с. 2.9. Датчики перепада давления:  
 а-ПЛХ-412; 1, 5-датчик ЛХ-412; 2, 4-струевыпрямитель;  
 б-на базе двух датчиков ДД-Ю: 1-датчик ДД-Ю; 2-корпус; 3-сужающее устройство



Мнимая часть импеданса

$$\operatorname{Im} z = \omega M, \quad (2.37)$$

где  $\omega$  - угловая частота пульсаций;  
 $M$  - колеблющаяся масса жидкости в акустических единицах.

$$M = \frac{\rho l}{S} + \frac{\rho}{d F\left(\frac{d}{D}\right)}, \quad (2.38)$$

где  $\rho$  - плотность жидкости;  
 $d$  - диаметр отверстия;  
 $l$  - длина отверстия;  
 $S$  - площадь отверстия;  
 $D$  - диаметр трубопровода;

$F\left(\frac{d}{D}\right)$  - функция Фока.

Функция Фока определяется выражением

$$F\left(\frac{d}{D}\right) = \left(1 - 1,41 \frac{d}{D} + 0,34 \frac{d^3}{D^3}\right)^{-1}. \quad (2.39)$$

Таким образом,

$$z = 2 \frac{\Delta p_{ср}}{Q_{ср}} + i \omega \left( \frac{\rho l}{S} + \frac{\rho}{d F\left(\frac{d}{D}\right)} \right). \quad (2.40)$$

В уравнении (2.38) первое слагаемое - масса столба жидкости в отверстии диафрагмы в акустических единицах, второе слагаемое выражает присоединенную массу, являющуюся следствием нарушения плоского характера волны.

Модуль импеданса (2.40) является амплитудно-частотной характеристикой диафрагмы:

$$\frac{\delta \Delta p}{\delta Q} = |z| = \sqrt{\left(\frac{2 \Delta p_{ср}}{Q_{ср}}\right)^2 + \omega^2 \left[ \frac{\rho l}{S} + \frac{\rho}{d F\left(\frac{d}{D}\right)} \right]^2}. \quad (2.41)$$

При сравнительных испытаниях применялась диафрагма с параметрами:

$$\begin{aligned}
 l &= 0,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}; & \rho &= 0,5 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^2}; \\
 d &= 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & Q_{\text{ср}} &= 1,13 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}; \\
 D &= 14 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & p_{\text{ср}} &= 18,2 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}; \\
 s &= 23,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;
 \end{aligned}$$

$$|Z| = \sqrt{1,04 \cdot 10^{17} + \omega^2 3,32 \cdot 10^9}. \quad (2.42)$$

Как видно из уравнения (2.42) и его графика для частот меньше 1000 Гц с погрешностью, не превышающей 1%, вторым слагаемым под корнем (реактивным сопротивлением) можно пренебречь.

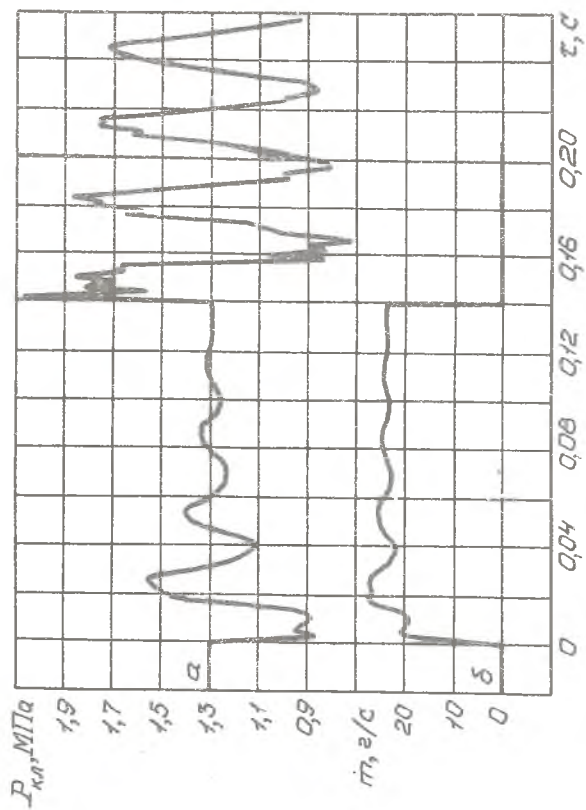
Для градуировочной характеристики можно получить выражение

$$\delta \bar{Q} = \delta \bar{\Delta p} 0,31 \cdot 10^{-6}. \quad (2.43)$$

Высокие динамические качества преобразователей перепада давления позволяют успешно использовать их для определения параметров динамических процессов и в переходных режимах. На рис. 2.10 показаны примеры экспериментальных переходных процессов по давлению и расходу, полученных в расходной магистрали при открытии и закрытии клапана. Результаты анализа позволяют констатировать, что предложенная схема расходомера позволяет уверенно измерять динамические составляющие расхода с характерным временем менее 0,01 с.

### 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Частотные испытания проводились на установке с вытеснительной подачей жидкости. Пульсации расхода создавались с помощью пульсатора, подключенного параллельно дроссельной шайбе и периодически открывающего обводной трубопровод. Частота пульсаций регулировалась изменением скорости приводных электродвигателей.



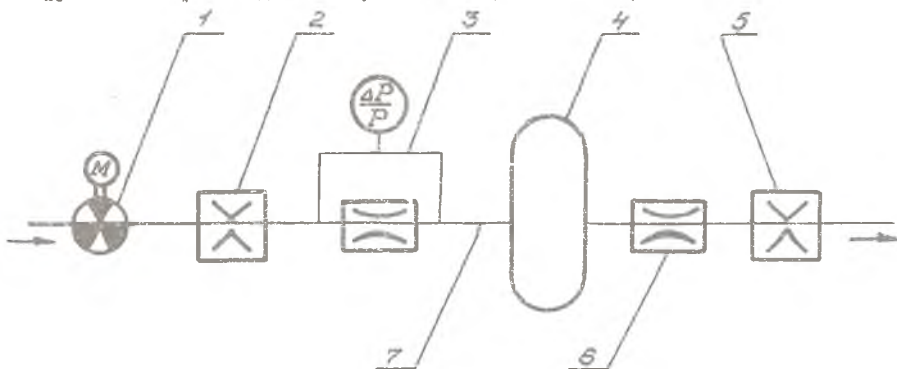
Р и с. 2.10. Переходные процессы в сечении перед клапаном однониточной магистральной: а - по давлению; б - по расходу

Амплитуда пульсаций определялась соотношением проходных сечений пульсатора и дроссельной шайбы и регулировалась изменением диаметра шайбы и осевого размера окна в пульсаторе.

При испытаниях использовались пульсаторы с вращающимся золотником, обеспечивающие пульсации в диапазоне частот 0,5-2,5 Гц (пульсатор ЗД.600.540), 20-100 Гц (пульсатор ЗД.600.390), 100-1000 Гц (пульсатор 5С.684.000).

Исследуемые расходомеры устанавливались в соответствии со схемой, изображенной на рис. 3.1.

Назначение баллона 3 - создание граничных условий  $\bar{p} = 0$  на конце трубопровода 6. Назначение дроссельной шайбы 5 - создание за диафрагмой 4 противодействия, исключающего кавитацию.



Р и с. 3.1. Схема установки для проведения частотных испытаний расходомеров: 1 - пульсатор; 2 - расходомер (ДПР-20, РУОФ-1 или ДР-55); 3 - датчик перепада давления ПЛХ-412; 4 - баллон ( $V = 100$  л); 5 - тахометрический расходомер; 6 - дроссельная шайба; 7 - трубопровод

Проведению частотных испытаний предшествовало снятие градуировочных характеристик датчиков расхода ДПР-20, ДР-55-2, РУОФ, диафрагмы с датчиком ПЛХ-412 и определение частотных характеристик каналов вторичной аппаратуры (тензостанции ЛХ-7000).

В процессе проведения частотных испытаний аппаратуры для измерения пульсирующего расхода задавались периодические, близкие к синусоидальным, колебания расхода с дискретными значениями частоты. На каждой фиксированной частоте проводилось осциллографирование параметров.

Обработке подвергались участки осциллограммы с установившимся периодическим процессом, достаточно отдаленные от момента подачи периодических возмущений данной частоты.

Определение масштабов записи сигналов с датчиков ЛХ и ПЛХ, имеющих линейную градуировочную характеристику, проводилось по калибровочным уровням, которые фиксировались на осциллограмме до и после окончания измерения.

В результате обработки были получены амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная (ФЧХ) характеристики сравниваемых расходомеров.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве наименее инерционного измерителя пульсирующего расхода была принята диафрагма с датчиком перепада давления ПЛХ-412 и ультразвуковой расходомер РУФ-1. Сравнение этих расходомеров проводилось в частотном диапазоне 0-800 Гц. Разница в значениях амплитуд расхода, измеренных обоими методами, была в пределах 15%.

Из АЧХ диафрагмы следует, что ее реактивное сопротивление начинает проявляться при частотах, превышающих 1000 Гц. В исследуемом диапазоне частот диафрагму можно считать пропорциональным звеном для заданного среднего значения расхода, а коэффициентом передачи считать действительную часть импеданса диафрагмы

$$\frac{\sigma_{\Delta p}}{\sigma_Q} = Z = \frac{Z_{\Delta p_{cp}}}{Q_{cp}} .$$

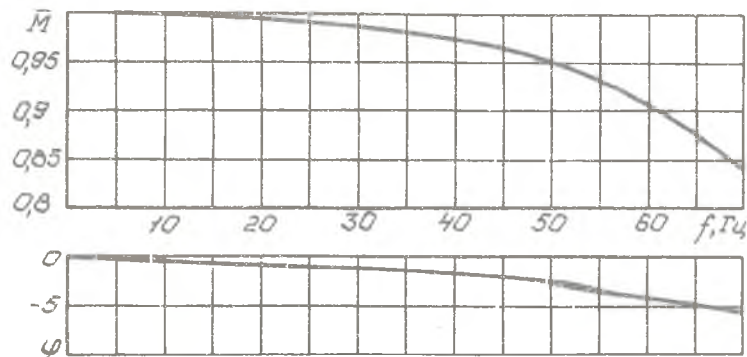
Это выражение было получено при обычной линеаризации уравнения расхода через диафрагму для малых отклонений от среднего значения расхода. Такое же выражение получено при гармонической линеаризации уравнения расхода для случая  $Q_{cp} > \sigma_Q$  и применимо для определения амплитуды первой гармоники колебаний расхода при сравнительно больших амплитудах колебаний.

Экспериментальные АЧХ и ФЧХ расходомера ДР-20 показаны на рис. 4.1. Как видно, искажение по амплитуде в диапазоне частот 0 - 50 Гц не превышает 5%, искажение по фазе -  $3^0$ .

Периодические колебания расхода вызывают не только частотную, но и амплитудную модуляцию сигнала датчика ДР-55-2, которая характери-



зует изменение переменной составляющей расхода. Эта кривая использовалась при построении экспериментальной АФЧХ расходомера ДР-55-2.



Р и с. 4.1. Экспериментальные амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики расходомера ДР-20

В реализованном диапазоне частот 0–10 Гц экспериментальная и расчетная характеристики близки друг к другу.

Постоянная времени датчика, определенная по экспериментальной АФЧХ, составляет 0,0056 с. Расчетная постоянная времени – 0,0051 с. Небольшое отличие является следствием допущений, которые были приняты при выводе дифференциального уравнения движения турбинки датчика ДР, в частности неучет трения в опорах крыльчатки. Реализовать остальную часть АФЧХ при  $f > 10$  Гц не удастся из-за дискретности выходного сигнала (средняя частота выходного сигнала составляла при испытании 80 Гц). При максимальном расходе, соответствующем для ДР-55-2 частоте 220 Гц, диапазон возмущающих частот может быть расширен до 25 Гц. Таким образом, фактором, ограничивающим пределы применения турбинного расходомера ДР-55-2 для измерения пульсирующего расхода, является дискретность выходного сигнала.

Результаты сравнения динамических характеристик датчика ДР-20 и метода измерения пульсирующего расхода по перепаду давления на отрезке гладкой трубы показывают, что разброс результатов измерения амплитуды пульсирующего расхода обоими методами составляет 25% в диапазоне частот 0–20 Гц.

Точное определение АЧХ и ФЧХ расходомера предполагает приведение показаний эталонного расходомера (в данном случае диафрагмы с датчиком ПЛХ-412) к сечению трубопровода, в котором находится исследуемый расходомер.

Акустическая поправка на амплитуду и фазу пульсирующей скорости (расхода) на частоте 50 Гц составляла  $\Delta \delta \sigma = 3\%$ ,  $\delta \varphi < 1\%$ . На частотах, которые меньше 20 Гц, акустическая поправка не учитывалась из-за ее малости.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее высокими динамическими качествами среди испытанных расходомеров обладают диафрагмы с датчиками перепада давления типа ПЛХ-412 и ультразвуковой расходомер РУОФ-1. В диапазоне частот 0 - 800 Гц они измеряют амплитуду и фазу колебаний расхода без искажений.

2. Датчик ДПР-20 в диапазоне частот 0-50 Гц можно считать пропорциональным звеном.

3. Частотный диапазон применения турбинного расходомера ДР-55-2 ограничивается дискретностью его выходного сигнала и составляет для расхода 1 л/с 0-10 Гц.

4. Сравнение результатов измерения амплитуды пульсирующего расхода датчиком ДПР-20 и по перепаду давлений на отрезке гладкой трубы показало разброс примерно 25% в диапазоне частот 0-20 Гц.

#### Список рекомендуемой литературы

1. К р е м л е в с к и й П.П. Расходомеры и счетчики количества. Л.: Машиностроение, 1989. 701 с.
2. Г р и з о д у б Ю.Н. Применение теории пассивных четырехполюсников к расчету распространения колебаний давления в разветвленных гидравлических системах авиадвигателей //Изв. ОИИ АН СССР. Автоматика и телемеханика. 1951. Т. XI. № 2. С.105-120.
3. Б о б р о в н и к о в Г.Н., Н о в о ж и л о в Б.М., С а р а ф а н о в В.Г. Бесконтактные расходомеры. М.: Машиностроение, 1985. 128 с.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Введение.....	3
1. Общая характеристика динамических свойств различных типов расходомеров.....	5
2. Описание объектов исследования.Расчеты динамических характеристик.....	7
2.1. Тахометрический датчик расхода ДР-55-2....	7
2.2. Ультразвуковой расходомер РУОФ-1.....	15
2.3. Датчик пульсаций расхода ДПР-20.....	17
2.4. Метод измерения мгновенного значения пульсирующего расхода по инерционному перепаду давления на участке гладкой трубы.....	20
2.5. Сужающее устройство с датчиком перепада давления.....	25
3. Методика проведения частотных испытаний.....	29
4. Результаты исследования.....	32
Список рекомендуемой литературы .....	34

А р ш     Альберт Давидович  
Ж у к о в с к и й     Александр Евгеньевич  
М а л е е в     Алексей Филиппович

ИЗМЕРЕНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩИХ РАСХОДОВ  
РАБОЧЕГО ТЕЛА

Редактор Т.К.К р е т и н и н а  
Техн.редактор Г.А.У с а ч е в а  
Корректор Т.П.Ж б а н н и к о в а

Свод.тем.пл. № 54

Подписано в печать 9.01.92.     формат 60x84<sup>I</sup>/16.  
Бумага оберточная. Печать офсетная. Усл.печ.л. 2,1.  
Усл.кр.-отт. 2,2.     Уч.-изд.л. 2,0.     Тираж 200 экз.  
Заказ № 200.     Цена 50 к.

Самарский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Типография им. В.П.Мяги Самарского полиграфического  
объединения. 443099 Самара, ул. Венцека, 60.