

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

**АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ**

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК 534.
ББК 22.32
А 443

Авторы: В.П. Шорин, Е.В. Шахматов, А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор Н.В. Д и л и г е н с к и й,
д-р техн. наук, профессор В.В. Б и р ю к

Акустические методы и средства измерения пульсаций давления / Шорин В.П. и др. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. - 132 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-0591-2

Изложены сведения по использованию информации о пульсациях давления при доводке авиационных двигателей. Предложены акустические измерительные цепи с подводящим каналом, датчиком пульсаций давления и элементами коррекции частотных характеристик с целью повышения динамической точности в условиях повышенных температур и вибраций. Разработаны математические модели и методы расчета корректирующих элементов с сосредоточенными и распределенными параметрами. Описаны программные комплексы для расчета частотных характеристик измерительных цепей и обработки экспериментальных данных по пульсациям давления в объекте контроля. Приведены примеры применения акустических измерительных цепей при доводке энергетических установок.

Монография будет полезна инженерно-техническим работникам предприятий аэрокосмической отрасли, аспирантам и студентам технических вузов.

Монография подготовлена и издана при поддержке Губернского гранта в области науки и техники.

УДК 534.
ББК 22.32

ISBN 978-5-7883-0591-2

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

© Самарский научный центр
Российской академии наук, 2007

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A - амплитуда колебаний
 A, B, C, D - коэффициенты матрицы четырехполюсника
 C - акустическая емкость
 D_n - коэффициент диссипации волн
 L - акустическая индуктивность
 $M(\omega), M(f)$ - амплитудно-частотная характеристика
 P - давление
 R - гидравлическое сопротивление, газовая постоянная
 Re - число Рейнольдса
 S - площадь
 T - температура
 V - объем
 $W(j\omega)$ - частотная функция
 Γ - коэффициент распространения волн
 Δ - приращение, ошибка
 Π - пористость
 c - скорость распространения звука
 d - диаметр
 f - циклическая частота колебаний
 k - коэффициент, учитывающий гидравлические потери
 κ - коэффициент адиабаты
 l - длина
 p - комплексная амплитуда колебаний давления
 q - комплексная амплитуда колебаний объемного расхода
 α - коэффициент затухания волн на единицу длины трубопровода
 β - фазовый сдвиг волн на единицу длины трубопровода
 γ - коэффициент распространения волн
 μ - динамическая вязкость
 ν - кинематическая вязкость
 ρ - плотность рабочей среды
 t - время
 $\varphi(\omega)$ - фазочастотная характеристика
 ω - угловая частота колебаний
 $j = \sqrt{-1}$ - мнимая единица

ИНДЕКСЫ

q - указывает на принадлежность параметра к расходу

Δp - указывает на принадлежность параметра к перепаду давления

v - волновод

г – газ

δ - датчик

жс - жидкость

доп - допустимый

ин - инерционный

к - канал

кп - капилляр

кр - критический

лн - линейный

н - нагрузка

нб - наибольший

пк - проволока

пор - пористый

ср - средний

ф - фильтр

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АЧХ - амплитудно-частотная характеристика

АФНЧ - акустический фильтр нижних частот

ГТД - газотурбинный двигатель

ЖРД – жидкостный ракетный двигатель

КЭ – корректирующий элемент

ЛИИ – летно-исследовательский институт

НИИФИ – научно-исследовательский институт физических измерений

СКБМ – Самарское конструкторское бюро машиностроения

СНТК – Самарский научно-технический комплекс

ТРДДФ – турбореактивный двигатель двухконтурный с форсированием тяги

ФВЧ – фильтр высоких частот

ФНЧ – фильтр нижних частот

ФЧХ - фазочастотная характеристика.

ЦАГИ – центральный аэрогидродинамический институт

ЭУ – энергетическая установка

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ С ДАТЧИКОМ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ.....	9
1.1. Проблема измерения пульсаций давления в энергетических и технологических установках	9
1.1.1. Пульсации давления в энергетических и технологических установках	9
1.1.2. Средства коррекции частотных характеристик акустических измерительных цепей.....	12
1.2. Математические модели элементов акустических зондов.....	17
1.2.1. Цилиндрический трубопровод	17
1.2.2. Акустические емкости.....	20
1.2.3. Дросселирующие элементы.....	22
1.3. Выбор параметров подводящего канала акустического зонда без корректирующего элемента.....	25
1.4. Коррекция частотных характеристик акустического зонда сосредоточенными сопротивлениями.....	28
1.4.1. Коррекция частотных характеристик зонда одним дросселем.....	28
1.4.2. Коррекция частотных характеристик зонда двумя дросселями	32
1.5. Коррекция частотных характеристик зонда элементами с распределенными параметрами.....	36
1.5.1. Пористый поглотитель колебаний.....	36
1.5.2. Набор капиллярных каналов в цепи с температурно-неоднородным подводящим каналом	39
2. АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ДАТЧИКОМ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ	46
2.1. Низкочастотный акустический фильтр	46
2.2. Акустический зонд дифференциальной схемы с корректирующими дросселями.....	51
2.2.1. Акустический зонд с корректирующим дросселем, размещенным у датчика пульсаций давления	51
2.2.2. Акустический зонд с корректирующим дросселем, размещенным на входе в подводящий канал.....	56
2.3. Акустический зонд с корректирующим элементом в виде капиллярных каналов	58
2.4. Методика и программа расчета частотных характеристик измерительных цепей с акустическими корректирующими устройствами	63
2.4.1. Общие сведения о программе РУДИП для расчета частотных характеристик акустических зондов.....	64
2.4.2. Инструкция по пользованию программой РУДИП.....	66

2.4.3. Пример расчета частотных характеристик акустического зонда дифференциальной схемы с корректирующим элементом	70
2.5. Частотные испытания акустических зондов	74
2.5.1. Испытания акустических зондов при температуре окружающей среды	74
2.5.2. Испытания акустических зондов в высокотемпературных условиях	81
3. АКУСТИЧЕСКИЕ ЗОНДЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В БОРТОВЫХ И СТЕНДОВЫХ СИСТЕМАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	85
3.1. Измерение пульсаций давления в проточной части ГТД	85
3.2. Измерение пульсаций давления в форсажной камере ТРДДФ	90
3.3. Измерение динамического давления в поршневом двигателе	91
3.4. Измерение пульсаций давления в камере сгорания микроЖРД	94
3.5. Волноводная цепь струйно-акустического датчика температуры газа	98
3.6. Акустический зонд контроля вибронапряжения в лопатке турбомашин при стендовых испытаниях.....	106
4. ОБРАБОТКА И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКИХ ЗОНДОВ	114
4.1. Алгоритм обработки и восстановления сигналов.....	114
4.2. Программа ПОВС1 для обработки и восстановления сигнала по пульсациям давления	117
4.2.1. Общие сведения о программе ПОВС1	117
4.2.2. Инструкция по пользованию программой ПОВС1	117
Список литературы	126

ВВЕДЕНИЕ

При доводке и эксплуатации газотурбинных двигателей и других энергетических установок (ЭУ) важно иметь достоверную информацию о стационарных и динамических процессах в системах. Одним из основных параметров, несущих наиболее полную информацию о рабочих процессах в ЭУ, является давление, на долю которого приходится 25...30 % от объема всех измеряемых параметров. По данным национального Бюро Стандартов США, за счет измерения давления при испытаниях силовых установок поставляется от 30 до 50 процентов всей собираемой информации. Статическая погрешность объектовых систем измерения давления не должна превышать 0,5...1,5 %, а стендовых - 0,1...0,2 % [20,48,57]. Для получения достоверной информации о пульсационном состоянии узлов ЭУ необходимо, чтобы динамическая погрешность измерения пульсаций давления не превышала 3...10 % в частотном диапазоне 5...5000 Гц [12,15,20,22,24,25,36,48,50,56,57,62,65].

Высокоточные датчики давления не работоспособны при действии характерных для ЭУ дестабилизирующих факторов в виде высоких температур, вибраций. Поэтому датчики давления подключаются к точке измерения узким каналом, который в свою очередь из-за резонансов может привести к дополнительной динамической погрешности [13,36,41,43,56,57,59,68,70,71]. Восстановление информации о динамических процессах по сигналам, зарегистрированным с помощью резонирующих пневматических каналов с использованием средств вычислительной техники, не представляется возможным.

Повышение точности измерительных цепей может быть достигнуто соответствующим выбором их конструктивных параметров, а также использованием специальных акустических методов и средств. К настоящему времени выполнен ряд исследований динамических процессов в акустических измерительных цепях [21,37,40-47,49,57,68,69], разработаны конструкции КЭ [1-5,7-11], однако осуществлять операции синтеза измерительных цепей с КЭ, удовлетворяющих жестким требованиям по динамическим характеристикам пока не представляется возможным. Это связано, прежде всего, с недостаточной изученностью процессов в элементах цепей и соответственно с несовершенством их математических моделей, с отсутствием обоснованных методических подходов к выбору схем и параметров КЭ.

Теоретические основы создания измерительных цепей с акустическими КЭ изложены в ранней монографии авторов «Гидравлические и газовые цепи передачи информации», изданной в издательстве «Машиностроение» в 2000

году. С тех пор накоплен дополнительный материал по реализации методов и средств измерения пульсаций давления в условиях повышенных температур, ограниченности пространства под установку датчиков пульсаций давления, по применению указанных средств не только для измерения пульсаций давления, но и ряда других параметров, например, температуры газового потока, виброперемещений пера лопатки в условиях высоких температур.

В монографии рассматриваются задачи по доводке авиационных ГТД и других энергетических установок, решение которых связано с измерением пульсаций давления в проточной части двигателя. На основе патентной и научно-технической литературы проводится анализ акустических КЭ, определяются их преимущества и недостатки. Излагается теоретический материал, лежащий в основе разработки КЭ с сосредоточенными и распределенными параметрами.

Излагаются методика и алгоритм программы расчета частотных характеристик измерительных цепей, позволяющей рассчитывать их частотные характеристики с учетом приведенного объема рабочей полости датчика пульсаций давления, среднего давления в объекте контроля, изменения площади и температуры по длине подводящего канала, схем и параметров КЭ. С использованием разработанной программы можно оценить ожидаемую динамическую погрешность измерительной цепи, подобрать параметры КЭ, при которых погрешность измерения пульсаций давления не превысит заданную величину в определенном диапазоне частот.

Описывается стендовое оборудование и измерительно-обрабатывающий комплекс для проведения частотных испытаний измерительных цепей в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. Приводятся результаты стендовых исследований измерительных цепей и анализ их динамической погрешности.

Разработанные авторами конструкции акустических зондов, включающих подводящий канал, КЭ и датчик, применяются для измерения пульсаций давления в проточной части ГТД при их стендовой доводке на ряде предприятий аэрокосмической отрасли.

Авторы благодарны руководству и сотрудникам ОАО СНТК имени Н.Д. Кузнецова, в частности начальнику отдела Ильинскому С.А., НИИФИ, Московскому филиалу ЦАГИ за предоставленную возможность проведения у них экспериментальных исследований, что значительно повысило практическую ценность материала монографии. В составлении программ расчета характеристик измерительных цепей и выбора их параметров активное участие приняли программисты Устинов А.В., Ильясова Н.Ю., за что авторы выражают им свою признательность.

Авторы благодарны также инженеру кафедры АСЭУ СГАУ Ермошкину А.З. за помощь в оформлении материала монографии.

1. АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ С ДАТЧИКОМ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

1.1. Проблема измерения пульсаций давления в энергетических и технологических установках

Доводка и эксплуатация авиационных двигателей и других энергетических установок неразрывно связаны с измерением пульсаций давления в проточной части двигателя, в камере сгорания, в стендовых системах. Учитывая экстремальность условий для средств измерения давления (высокая температура, вибрации) к ним предъявляются повышенные требования по надежности и точности. В данном разделе приводятся данные по пульсациям давления в системах энергетических установок и средствам их измерения.

1.1.1. Пульсации давления в энергетических и технологических установках

Накопленный за последние десятилетия опыт в области доводки энергетических установок как у нас в стране, так и за рубежом указывает на значительную роль, которая отводится пульсациям давления воздуха и газа. Например, работа газотурбинного двигателя (ГТД) сопровождается пульсациями давления, нестационарными течениями в воздуховодах и газоведах, в компрессоре и турбине, преобразованием энергии в камере сгорания. По мере интенсификации рабочего процесса в ГТД возрастает и роль нестационарностей при обеспечении требуемых показателей эффективности двигателя [24, 48, 50, 56].

Пульсации давления в воздухозаборнике могут стать причиной снижения запаса газодинамической устойчивости компрессора, спровоцировать вибрационное горение в камере сгорания и, по-видимому, могут вызывать интенсивные вибрации элементов двигателя. Поэтому при доводке ГТД проводятся регулярные измерения пульсаций давления в характерных его сечениях в зависимости от его конструктивной схемы, программы испытаний и исследования причин возможных дефектов.

Работы, выполненные рядом двигателестроительных фирм за рубежом и в нашей стране в ЦАГИ и ЛИИ привели к необходимости широкого использования методов статистического анализа пульсаций давления для оценки совместимости воздухозаборника и газотурбинного двигателя. Процессы, связанные с изменением динамического давления в воздухозаборнике ГТД, относятся в основном к случайным эргодическим стационарным процессам, для которых осреднение по ансамблю выборочных

функций может быть заменено осреднением по времени одной выборочной функции:

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt, \quad (1.1.1)$$

где $y(t)$ – функция случайного процесса; \bar{y} – осредненная величина; T – интервал времени осреднения.

Основные свойства случайных процессов выражаются через ряд функций. Наиболее важными из них являются:

- а) среднеквадратическое отклонение;
- б) корреляционная функция;
- в) спектральная плотность мощности;
- г) плотность вероятности случайного процесса.

Среднеквадратическая величина пульсаций полного давления широко применяется при оценке совместимости воздухозаборника и двигателя. Автокорреляционные функции представляют мощное средство для выявления детерминированных процессов. Спектральная плотность мощности пульсаций полного давления на входе в ГТД дает представление о частотной структуре исследуемого процесса, а также о распределении энергии по частотным компонентам. Плотность вероятности физического процесса дает представление о мгновенных значениях, позволяет выявлять гармонические процессы на фоне случайных.

Из перечисленных выше статистических характеристик воздушного потока для оценки совместимости воздухозаборника с двигателем часто используется среднеквадратическое отклонение полного давления. На отдельных фирмах в качестве параметра, определяющего степень турбулентности потока, используется коэффициент турбулентности K_T [24]:

$$K_T = \frac{\Delta P_{\text{ср.кв.}}}{\bar{P}}, \quad (1.1.2)$$

где \bar{P} – средняя величина полного давления в канале, $\Delta P_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [P(t)]^2 dt}$

– среднеквадратическая величина пульсаций полного давления в поперечном сечении канала.

Предполагая, что случайные отклонения пульсаций полного давления распределены по нормальному закону, можно записать связь между средней величиной абсолютного отклонения и среднеквадратическим значением:

$$\Delta P_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{1}{T} \int_0^T |\Delta P| dt \right). \quad (1.1.3)$$

Для выяснения чувствительности двигателя к мгновенным полям полного давления используют ряд параметров. Наиболее прост параметр Δ , который характеризует пределы, в которых изменяется давление в сечении канала перед компрессором:

$$\Delta = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{\bar{P}}, \quad (1.1.4)$$

где P_{\min} и P_{\max} – соответственно минимальные и максимальные значения полного давления, \bar{P} – среднее значение полного давления в рассматриваемом сечении. С точки зрения устойчивости компрессора двигателя, более важны минимальные величины полного давления потока:

$$\Delta_c = \frac{\bar{P} - P_{\min}}{\bar{P}}. \quad (1.1.5)$$

Более информативным для оценки искажений полного давления потока на входе в компрессор является параметр искажения NDI, введенный в практику испытаний газотурбинных двигателей фирмой «General Electric»:

$$NDI = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{\bar{P}} \sqrt{SEY},$$

где S – коэффициент формы поля, определяемый как

$$S = \frac{\pi}{2} \left\{ \frac{\bar{P} - P_{\min}}{\bar{P} - P_{\max}} \right\}$$

E – коэффициент протяженности зоны пониженного давления, определяемый выражением:

$$E = 2 \frac{A_L}{A_A};$$

Y – коэффициент режима двигателя, может принимать значения от 1 до 2,3 в зависимости от частоты вращения ротора двигателя; A_A – площадь поперечного канала воздухозаборника, где установлен прибор для измерения давления; A_L – часть площади сечения A_A , в которой измеренное полное давление меньше, чем величина осредненного полного давления; \bar{P} – средняя величина полного давления в сечении A_A ; P_{\min} – наименьшая величина полного давления в области низкого давления A_L ; P_{\max} – наибольшая величина полного давления в области A .

Из приведенного краткого анализа ясно, как важно получить достоверную информацию о пульсационных характеристиках узлов двигателя. Измерение пульсаций давления производится при значительных изменениях среднего давления (от атмосферного до значения давления за компрессором высокого давления) и температуры. При многообразии датчиков давления, выпускаемых отечественными предприятиями,

отсутствуют универсальные датчики, которые можно было бы непосредственно использовать для измерения нестационарных давлений, что представляет серьезную проблему при доводке двигателей и других энергетических установок. Поэтому возникает необходимость в создании акустических зондов, позволяющих измерять пульсации давления при испытаниях двигателя.

Как отмечено во многих работах подводный канал зонда становится источником динамической погрешности, величина которой зависит от среднего давления, температуры рабочего тела, геометрии волновода и характеристик датчика пульсаций давления. Полностью устранить влияние волноводного канала на точность акустического зонда при помощи КЭ не представляется возможным. В связи с успехами микропроцессорной техники появилось мнение, согласно которому предлагается обходиться без элементов акустического согласования в акустических зондах, вводя в рассмотрение частотные характеристики, полученные расчетным путем. Однако в отечественной практике указанное предложение не получило развития. Это связано с тем, что зонд без КЭ многократно усиливает сигнал в полосе пропускания и подавляет его на антирезонансных частотах. Такая измерительная система в ряде случаев будет многократно усиливать шумовые компоненты и подавлять полезные сигналы, что в значительной мере затруднит получение достоверной информации. К тому же необходимо отметить, что многократное возрастание уровня пульсаций на отдельных частотах приводит к проявлению нелинейностей при передаче пульсаций и возникновению ситуации, связанной с неопределенностью степени демпфирования колебаний в волноводном канале. Поэтому согласование подводного канала зонда акустическими нагрузками является необходимым условием получения достоверной информации о пульсационном состоянии энергетических установок. Многие фирмы [35], производящие измерительную аппаратуру, создают датчики пульсаций давления, работоспособные в условиях высоких температур. Однако, как правило, чувствительность таких датчиков недостаточна для регистрации слабых пульсаций давления.

1.1.2. Средства коррекции частотных характеристик акустических измерительных цепей

К гидравлическим и газовым измерительным цепям, предназначенным для регистрации быстропротекающих процессов, предъявляются достаточно жесткие требования по ширине полосы равномерного пропускания частот. В зависимости от назначения системы она должна составлять от нескольких сотен герц до десятка килогерц. При размерах конструктивных элементов

цепей, используемых на практике, обеспечение указанных требований без введения в цепь специальных КЭ невозможно.

Динамическая погрешность измерительных цепей, в которых в качестве рабочего тела используются капельная жидкость или газ, обусловлена в основном резонансными явлениями [13,17,18,51,61,69]. Одним из простых способов выравнивания характеристик цепей является заполнение каналов передачи сигнала звукопоглощающим материалом, однако при этом сужается диапазон равномерного пропускания частот вследствие сильного затухания высокочастотных составляющих. Для расширения полосы равномерного пропускания частот в работе [12] предложено подключить к волноводному каналу согласованную акустическую нагрузку в виде длинного трубопровода (рис. 1.1.1). Длина согласованного трубопровода подбирается экспериментально в соответствии с допустимой погрешностью передачи сигнала. Такие КЭ обеспечивают передачу колебаний давления в диапазоне частот до 10 кГц с неравномерностью АЧХ цепи не более ± 5 дБ.

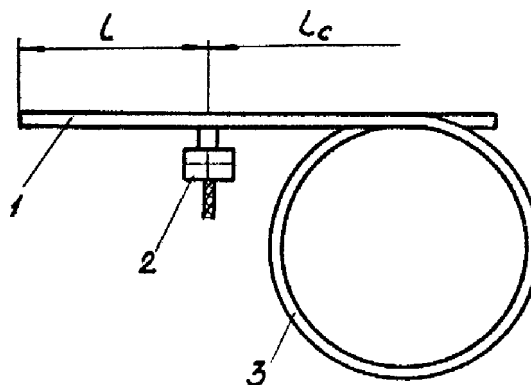


Рис. 1.1.1. Принципиальная схема зонда с согласованной нагрузкой в виде трубопровода ограниченной длины: 1 – подводящий канал; 2 – датчик пульсаций давления; 3 – согласованный трубопровод

Поскольку добротность измерительных каналов, заполненных маловязкими капельными жидкостями, значительно выше добротности тех же каналов с газами, для обеспечения минимальной динамической погрешности цепей необходимы длины согласованных трубопроводов порядка десяти и более метров. Для сокращения длины согласующего трубопровода его заполняют пористым материалом (рис. 1.1.2).

Уменьшение габаритов и снижение массы цепи достигается в схемах с низкочастотным корректирующим RC - фильтром. Входное сопротивление такого фильтра подбирается равным волновому сопротивлению подводящего канала в требуемом диапазоне частот. RC - фильтр, подключенный байпасно датчику давления, реализован в аэрометрическом приемнике для измерения нестационарных давлений в газовом потоке (рис. 1.1.3).

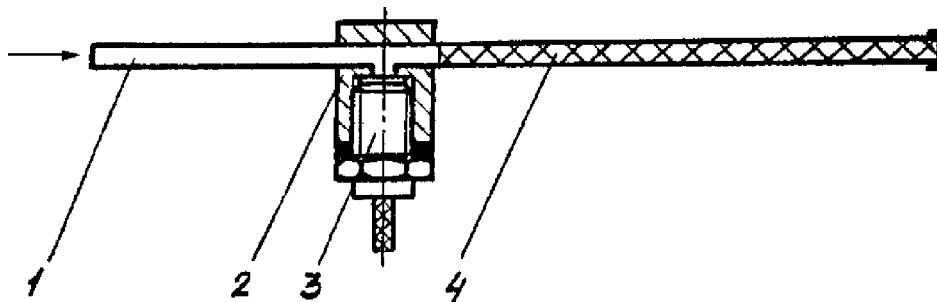


Рис. 1.1.2. Принципиальная схема устройства для измерения пульсаций давления с согласованным трубопроводом, заполненным пористым материалом [4]: 1 – подводящий канал; 2 – корпус; 3 – датчик пульсаций давления; 4 – согласованный трубопровод с наполнителем

В этом устройстве сопротивление выполнено в виде щелевого дросселя, а емкость – в виде коаксиального трубопровода, охватывающего подводящий канал.

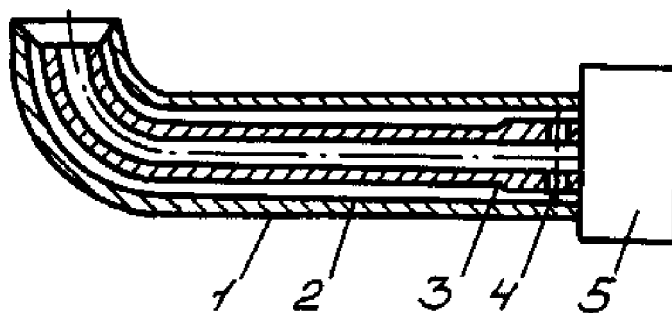


Рис. 1.1.3. Аэрометрический приемник пульсаций давления [1]: 1 – наружная трубка; 2 – подводящий канал; 3 – кольцевая щель; 4 – перепускные окна; 5 – датчик пульсаций давления

Применение специальных вставок в сочетании с коротким подводящим каналом [5] (рис. 1.1.4) позволило скорректировать АЧХ в аэрометрическом приемнике в диапазоне частот до 3000 Гц. Определенный спад частотной характеристики устройства, обусловленный гидравлическими потерями по длине канала при частотах выше 1500 Гц, компенсирован резонансом колебательного контура, образованного каналом с расширительной камерой демпфирующей вставки.

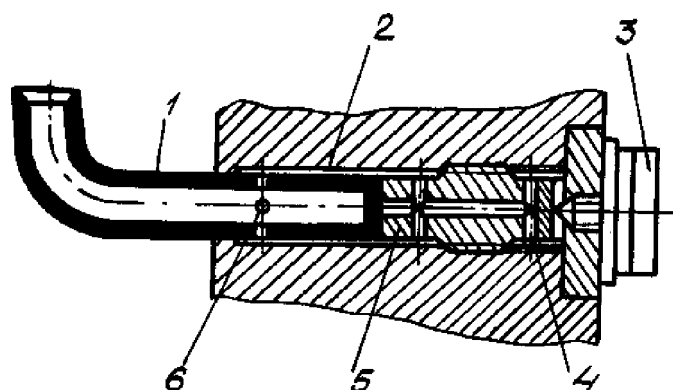


Рис. 1.1.4. Устройство для измерения нестационарного давления газового потока: 1 – подводящий канал; 2 – расширительная камера; 3 – датчик пульсаций давления ДМИ; 4 – кольцевая проточка; 5 – демпфирующая вставка; 6 – радиальные отверстия

Аналогичным по принципу действия является аэрометрический приемник для измерения нестационарных давлений (рис. 1.1.5). Роль активного сопротивления в этом устройстве отведена регулируемому щелевому дросселю, позволяющему обеспечивать наилучшее согласование присоединенной акустической нагрузки с волновым сопротивлением подводящего канала.

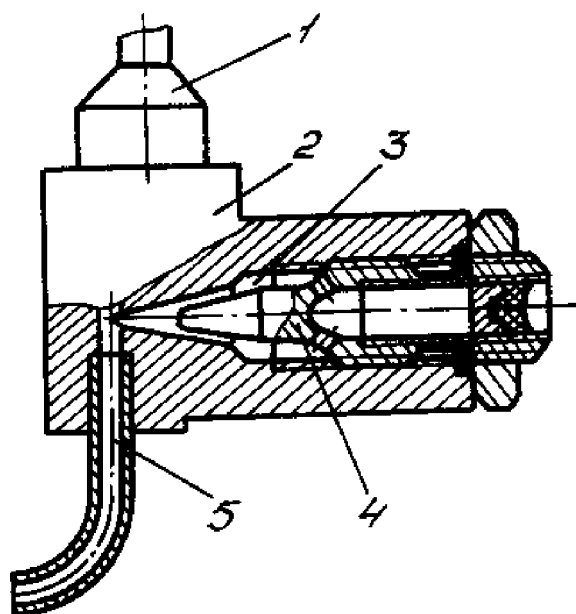


Рис. 1.1.5. Аэрометрический приемник для измерения нестационарных давлений [2]: 1 – датчик давления; 2 – корпус; 3 – расширительная камера; 4 – коническая игла; 5 – подводящий канал

Приведенные на рис. 1.1.3, 1.1.4 и 1.1.5 измерительные устройства обладают значительными габаритами, обусловленными необходимостью использования расширительных камер, и, кроме того, их АЧХ зависит от уровня среднего давления.

Для исключения зависимости частотных характеристик измерительных устройств от уровня среднего давления в ряде конструкций предусматривается проток газа через корректирующий дроссель, например через радиальные щели акустического *RC*-фильтра (рис. 1.1.6). Однако точное согласование сопротивления в этой схеме возможно лишь при двух значениях статического давления. Кроме того, при работе в загрязненных потоках снижается надежность устройства.

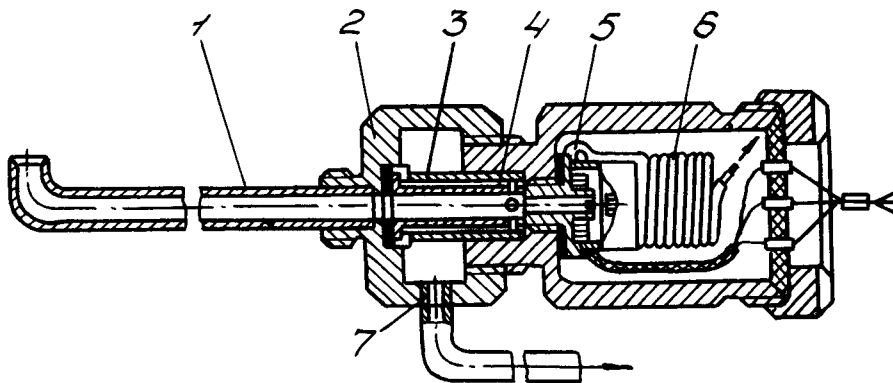


Рис. 1.1.6. Устройство для измерения пульсаций давления газа [3]: 1 – подводящий канал; 2 – расширительная камера; 3,4 – втулки дроссельного канала; 5 – датчик пульсаций давления ДМИ; 6 – капиллярный канал; 7 – дроссель

Согласование характеристик измерительной цепи в широком диапазоне среднего давления осуществлено в устройстве для измерения пульсаций давления газа (рис. 1.1.7) с регулируемым дросселем. При увеличении среднего давления происходит сжатие сифона и как следствие увеличение сопротивления пористой втулки до величины волнового сопротивления подводящего трубопровода.

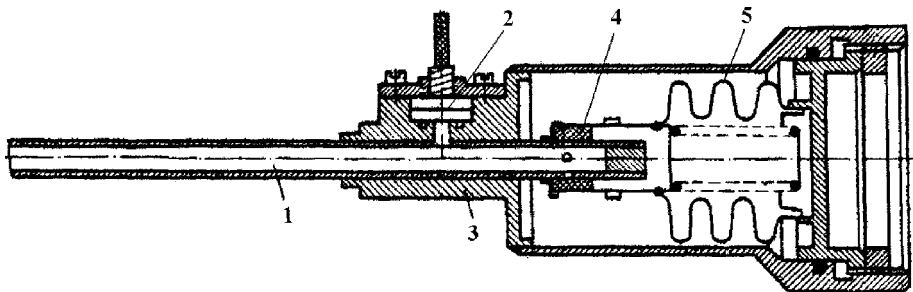


Рис. 1.1.7. Устройство для измерения пульсаций давления газа (многорежимное) [7]: 1 – подводящий канал; 2 – датчик пульсаций давления; 3 – корпус; 4 – корректирующий дроссель в виде пористой втулки; 5 – вакуумированный сиффон

Несмотря на широкое применение акустических средств коррекции частотных характеристик измерительных цепей, до настоящего времени

отсутствуют обоснованные методы выбора их схем и конструктивных параметров.

1.2. Математические модели элементов акустических зондов

Основными элементами гидравлических и газовых измерительных цепей являются трубопроводы (соединительные каналы), дросселирующие и емкостные элементы. Ниже представлены математические модели элементов измерительных цепей для условий, соответствующих показателям протекания процессов и обоснование схем коррекции частотных характеристик акустических зондов.

1.2.1. Цилиндрический трубопровод

Основным элементом цепи, который следует рассматривать как систему с распределенными параметрами, является участок гидравлического или газового тракта с характерными размерами, сравнимым с длиной волны. Это может быть цилиндрический трубопровод, соединительный канал с переменным по длине поперечным сечением, параметры рабочей среды в котором изменяются по длине.

Рассматривая участок цепи как пассивный четырехполюсник, уравнения связи между динамическими составляющими давления и объемного расхода в начале и конце участка можно представить матрицей передачи [34,47,64]

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} p_2 \\ q_2 \end{bmatrix}, \quad (1.2.1)$$
$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\Gamma l & Z_g sh\Gamma l \\ \frac{1}{Z_g} sh\Gamma l & ch\Gamma l \end{bmatrix}.$$

Здесь: p_1, p_2 – динамические составляющие давления в начале и конце участка; q_1, q_2 – динамические составляющие объемного расхода в начале и конце участка; Z_g – волновое сопротивление; Γ – постоянная распространения волнового процесса; l – длина трубопровода.

Зависимости для расчета волнового сопротивления Z_g и постоянной распространения волнового процесса Γ определяются геометрией участка, режимом и схематизацией движения рабочей среды.

Нестационарному движению жидкости в трубопроводах посвящены обширные теоретические и экспериментальные исследования [34,38,42,58].

Для описания процессов, как правило, используются линейные или линеаризованные математические модели.

При рассмотрении ламинарного режима колебательного движения вязкой теплопроводной сжимаемой рабочей среды в жестком трубопроводе постоянного сечения будем полагать:

- постоянство коэффициента вязкости и теплопроводности среды;
- малость средней скорости движения среды в сравнении со скоростью распространения звука;
- малость нормированного изменения плотности среды $\Delta\rho/\rho_0$ в протекающих процессах;
- отсутствие градиента давления по поперечному сечению трубопровода;
- малость отношения диаметра трубопровода к его длине;
- отсутствие теплоотвода от стенок трубы.

Принятые допущения приемлемы для подавляющего большинства измерительных цепей и дают возможность использовать для описания процессов в трубопроводах систему уравнений (1.2.1), полученных из решения уравнений количества движения, неразрывности, энергии и состояния.

При анализе систем с распределенными параметрами, в которых определяющими являются волновые явления, удобно использовать понятие скорости распространения возмущений. Для идеального газа она определяется соотношением

$$c^2 = \kappa \frac{P_{cp}}{\rho_0}, \quad (1.2.2)$$

а для капельной жидкости -

$$c^2 = \frac{\rho_0}{E_{жс}}, \quad (1.2.3)$$

где κ – коэффициент адиабаты, P_{cp} - среднее давление, ρ_0 - плотность рабочей среды, $E_{жс}$ - модуль объемной сжимаемости жидкости.

В инженерной практике используются простые приближенные зависимости, обеспечивающие достаточно высокое соответствие расчетных результатов экспериментальным данным. Здесь, прежде всего, следует отметить работы Карамы и Франка, Тийдемана [42, 60]. Показано, что для расчета частотных характеристик газовых теплопроводных цепей может быть использована так называемая высокочастотная теория. Предложенная модель пригодна, когда угловая частота сигнала ω превышает характеристическую частоту $\omega_v = 8\pi\nu/S$. В работе [60] доказывается, что расчетные выражения для постоянной распространения волнового процесса

Γ и волнового сопротивления трубопровода Z_e упростятся, если при $\omega > \omega_v$, ввести в рассмотрение распределенные по длине трубопровода параметры:

$$\text{сопротивление} \quad R = \frac{1}{2} L \sqrt{\omega \omega_v}; \quad (1.2.4)$$

$$\text{проводимость} \quad G = \frac{\kappa - 1}{2\sqrt{\text{Pr}}} c \sqrt{\omega \omega_v}; \quad (1.2.5)$$

$$\text{инертность} \quad L = \frac{\rho_0}{S}; \quad (1.2.6)$$

$$\text{упругость} \quad C = \frac{S}{\kappa P_{cp}}, \quad (1.2.7)$$

где Pr – число Прандтля.

С применением введенных параметров постоянную распространения волнового процесса можно представить в виде

$$\Gamma = \alpha + j\beta, \quad (1.2.8)$$

где α - затухание на единицу длины

$$\alpha = \left(\frac{\kappa - 1}{\sqrt{\text{Pr}}} + 1 \right) \sqrt{\frac{\pi \mu_0 \omega}{\kappa S P_{cp}}}; \quad (1.2.9)$$

β - фазовый сдвиг на единицу длины

$$\beta = \frac{\omega}{c}; \quad (1.2.10)$$

Z_e - волновое сопротивление трубопровода

$$Z_e = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \quad (1.2.11)$$

Согласно [42,60] амплитудно-частотные характеристики пневматических трубопроводов, рассчитанные по данной теории, отличаются от экспериментальных характеристик в области резонансных частот не более чем на 2 дБ, а расчетные и экспериментальные резонансные частоты - не более чем на 10 %. Эксперименты в работе были проведены для линий диаметром 4,3 мм и длиной до 6,1 м в частотном диапазоне (1...1000) Гц при давлении $(0,7...2,8) \cdot 10^5$ Па. При этом амплитуда колебаний давления по среднеквадратичному значению изменялась от 2 % до 20 % от среднего давления.

Расчетные выражения для постоянной распространения волнового процесса и волнового сопротивления трубопровода при ламинарном режиме движения капельных жидкостей можно получить на основе разложения в ряды функций Бесселя. Приближенные формулы, полученные Д.Н. Поповым на основе такого разложения, имеют следующий вид [58]:

$$\Gamma = \frac{\omega}{c} \left\{ \left[\frac{k_2}{2k_1} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{k_2^2}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} + j \left[\frac{k_2}{2k_1} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{k_2^2}} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}; \quad (1.2.12)$$

$$Z_e = \frac{\rho c}{S} \left\{ \left[\frac{k_2}{2k_1} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{k_2^2}} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} - j \left[\frac{k_2}{2k_1} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{k_2^2}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad (1.2.13)$$

где

$$k_1 = \frac{(1 - 2\sqrt{\Omega} + 4\Omega)(2\sqrt{\Omega} - 1)}{4\Omega - \sqrt{\Omega}}; \quad k_2 = \frac{4\Omega(2\sqrt{\Omega} - 1)}{4\Omega - \sqrt{\Omega}}, \quad \Omega = \frac{r_T^2 \omega}{8\nu}. \quad (1.2.14)$$

Расчетные соотношения дают погрешность менее 5 % при $\Omega = 1$, а при $\Omega > 2$ погрешность приближается к нулю.

При значениях $\Omega > 10$ расчетная формула для постоянной распространения волнового процесса и волнового сопротивления упрощаются:

$$\Gamma = \frac{\omega}{c} \left[\frac{2}{\sqrt{k_1 k_2}} + j \frac{k_2}{k_1} \right]; \quad (1.2.15)$$

$$Z_e = \frac{\rho_0 c}{S} \left[\frac{k_2}{k_1} - j \frac{2}{\sqrt{k_1 k_2}} \right]. \quad (1.2.16)$$

При $\Omega > 300$ предложены следующие зависимости:

$$\Gamma = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{\omega \nu}{2r_T^2}} + j \frac{\omega}{c}; \quad Z_e = \frac{\rho_0 c}{S} \sqrt{1 - j \sqrt{\frac{2\nu}{\omega r_T^2}}}.$$

1.2.2. Акустические емкости

Элементы емкостного сопротивления относятся к элементам с сосредоточенными параметрами и их характерные размеры много меньше длины волны колебаний ($l_x < \lambda/8$). Характеристики элементов с сосредоточенными параметрами описываются одним уравнением, связывающим две переменные (перепад давления и расход), т.е. они являются двухполюсниками. В случае использования линейных или линеаризованных моделей для описания характеристик названных элементов используется понятие импеданса (отношение перепада давления на элементе к объемному расходу через него) или обратной ему величины - проводимости.

При расчете колебательных процессов в большинстве моделей емкостей, целиком заполненных капельной жидкостью, учитывается только изменение потенциальной энергии рабочей среды внутри емкости. Емкости рассматриваются как реактивные сопротивления и их динамические свойства определяются импедансом

$$Z_n = -j \frac{\rho c^2}{\omega V_{np}}. \quad (1.2.17)$$

Под приведенным объемом V_{np} понимается внутренний объем условной емкости с абсолютно жесткими стенками, сжимаемость рабочей среды в которой равна податливости реальной конструкции, обусловленной сжимаемостью жидкости и увеличением объема полости за счет деформации стенок.

Для многих измерительных цепей теоретическое определение приведенного объема не представляется возможным. Поэтому V_{np} часто определяют экспериментально по результатам статических или динамических испытаний.

В качестве примера использования изложенной методики на рис. 1.2.1 показана экспериментально определенная зависимость объемной жесткости ($K = \rho c^2 / V_{np}$) входных полостей датчиков типа ДАТ от давления.

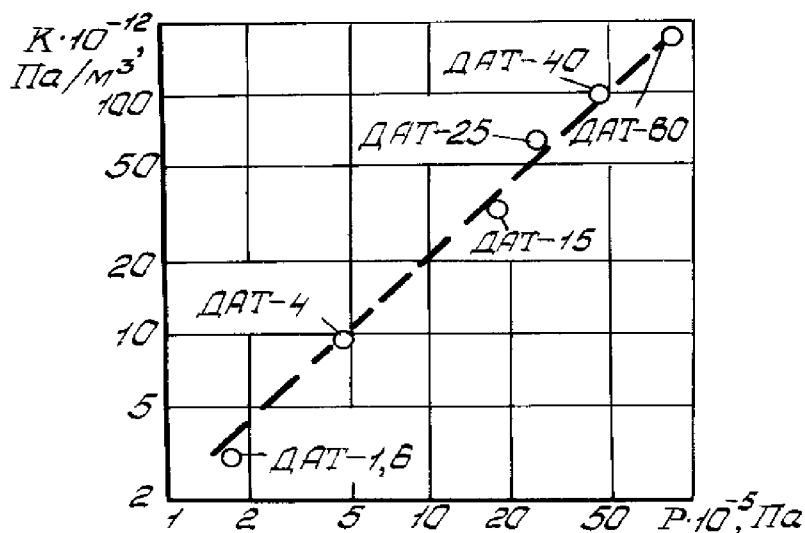


Рис. 1.2.1. Зависимость объемной жесткой полости датчиков давления типа ДАТ от их верхнего предела измерения: о – эксперимент; – – – – аппроксимация методом наименьших квадратов

Описание динамических свойств элементов емкостного сопротивления в виде полостей, заполненных газом, в общем случае представляет сложную задачу. С изменением давления температура газа в полости не остается постоянной. В проточной полости происходит энергетический обмен между

массой газа, находящейся в каждый данный момент времени в полости, и массой газа, поступающего в полость и вытекающего из нее, кроме того, происходит теплообмен с внешней средой через стенки полости.

Обычно процессы изменения состояния газа в полостях устройств, входящих в измерительные цепи, занимают промежуточное положение между изотермическим и адиабатическими и эти последние процессы могут рассматриваться как граничные. В большинстве практически важных случаев можно считать, что изменение давления в полости происходит в изотермических условиях, даже если температура газа в полости не остается строго постоянной. Импеданс емкости при этом допущении рассчитывается по формуле

$$Z_n = -j \frac{\kappa P_{cp}}{\omega V}, \quad (1.2.18)$$

где V – геометрический объем полости.

Динамические свойства полостей, заполненных капельной жидкостью и имеющих газовую подушку, можно рассчитывать по формуле (1.2.17) в той области частот, в которой доминирующую роль играет изменение потенциальной энергии элементов емкости. Величина приведенного объема при этом определяется экспериментально или рассчитывается на основе анализа процессов внутри полости. Так в формуле (1.2.17) приведенный объем полости, имеющей газовую подушку, при условии изотермичности процессов, определяется зависимостью [58]:

$$V_{np} = \frac{V}{1 + \delta} \left(\frac{\rho c^2}{\kappa P_{cp}} \delta + 1 \right), \quad \delta = \frac{V_e}{V_{жс}}.$$

1.2.3. Дросселирующие элементы

В пневматических и гидравлических измерительных цепях в качестве дросселирующих элементов наиболее широко применяются жиклеры, диафрагмы, дроссельные пакеты, капиллярные каналы, дроссели из пористого материала. Характеристики элементов определяют в основном экспериментально, и выбор их параметров осуществляют по полуэмпирическим зависимостям.

Пористые дроссели выполняются из различных материалов (металла, керамики) спеканием порошка. Известно применение фетра и других набивок. Ниже приводятся данные о характеристиках дросселей из материала МР [14,16], обладающего одними из лучших физико-механических свойств.

В дросселях из материала МР высокая омываемая поверхность, равная общей поверхности проволоки, из которой он изготовлен, отсутствуют

изолированные и тупиковые каналы. В отличие от устройств, спеченных из порошков, невозможна миграция частиц, образующих дроссель.

Некоторые конструктивные схемы дросселей из материала МР, предназначенных для коррекции характеристик измерительных цепей, приведены на рис. 1.2.2.

Характеристики дросселя из материала МР определяются его геометрическими параметрами (длина $l_{\text{д}}$, диаметр $d_{\text{д}}$), диаметром проволоки $d_{\text{нк}}$, из которой изготовлен материал, пористостью материала [14]

$$\Pi = 1 - \frac{M_3}{\rho_m V_{\text{д}}}, \quad (1.2.19)$$

где M_3 - масса заготовки из материала МР; ρ_m - плотность материала проволоки; $V_{\text{д}}$ - объем дросселя, который занимает материал МР.

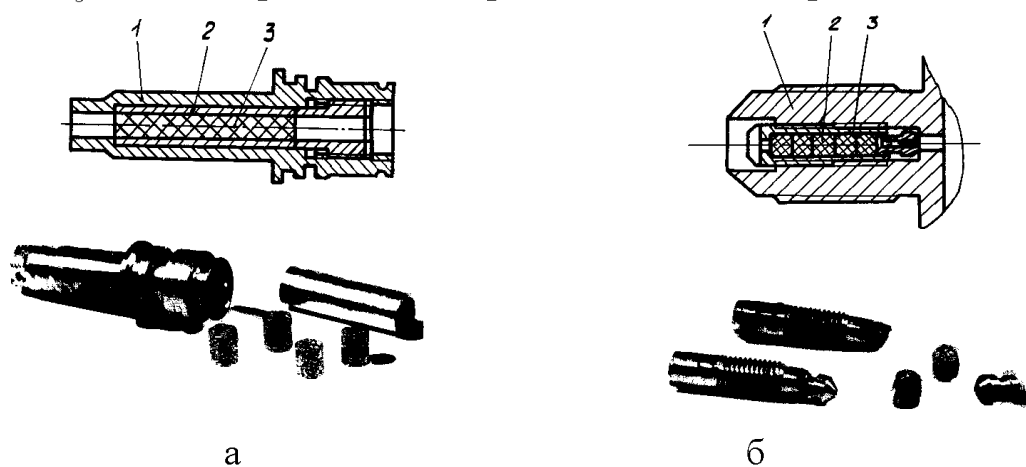


Рис. 1.2.2. Конструктивная схема и внешний вид дроссельного пакета из материала МР для систем управления двигателя (а) и датчиков давления (б): 1 – корпус; 2 – втулка; 3 – дроссельный пакет

Экспериментальными исследованиями пористых дросселей с $\Pi=0,35$; $0,4$ при периодическом движении керосина Т-1 и масла АМГ-10 в диапазоне частот (4...400) Гц установлено, что коэффициент гидравлического сопротивления не зависит от частоты колебаний и в пределах точности эксперимента совпадает с коэффициентом гидравлического сопротивления, определенным при установившемся движении жидкости (рис. 1.2.3).

Величина инерционного сопротивления дросселя мала по сравнению с его активным сопротивлением и находится в пределах погрешности измерения.

Коэффициент гидравлического сопротивления пористого дросселя при периодическом движении жидкости на основе экспериментальных данных определялся по формуле [67]:

$$\zeta_n = \frac{A_{\Delta p}}{A_q^2} \frac{d_{\text{нк}} \Pi^3 S_{\text{д}}^2}{\rho l_{\text{д}} (1 - \Pi)}, \quad (1.2.20)$$

а число Рейнольдса по зависимости

$$Re_n = \frac{A_q d_{нк}}{S_\partial \nu (1 - \Pi)}. \quad (1.2.21)$$

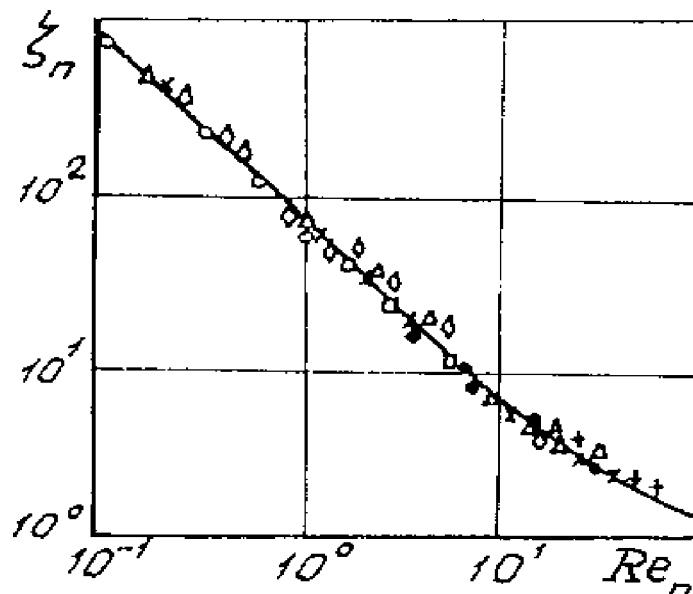


Рис. 1.2.3. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления дросселя из материала МР от числа Рейнольдса при периодическом движении жидкости: ----- расчет; * - 5 Гц; • - 10 Гц; x - 20 Гц - эксперимент при $\Pi=0,4$, рабочая среда керосин Т-1; ◐ - 4 Гц; Δ - 25 Гц; ◊ - 10 Гц; + - 400 Гц - эксперимент при $\Pi=0,35$, рабочая среда масло АМГ-10

В формулах (2.1.20) и (2.1.21) обозначено: A_q - амплитуда колебаний расхода жидкости; $A_{\Delta p}$ - амплитуда колебаний перепада давления на дросселе; $d_{нк}$ - диаметр проволоки, из которой изготовлен МР; S_∂ - площадь поперечного сечения дросселя, занятого материалом МР; ρ - плотность жидкости; l_∂ - длина дросселирующего элемента.

По результатам обработки экспериментальных данных импеданс дросселя из материала МР следует рассчитывать по формуле [67]

$$Z_\partial = \frac{\lambda_\partial \mu l_\partial (1 - \Pi)^2}{d_{нк}^2 \Pi^3 S_\partial}, \quad (1.2.22)$$

где λ_∂ - коэффициент, зависящий от структуры материала МР.

На рис. 1.2.4 показаны экспериментальные данные о величине импеданса дросселя из МР, полученные из статических проливок и путем частотных испытаний. Дроссель представлял собой цилиндр, спрессованный из проволоки Х18Н9Т диаметром 0,09 мм.

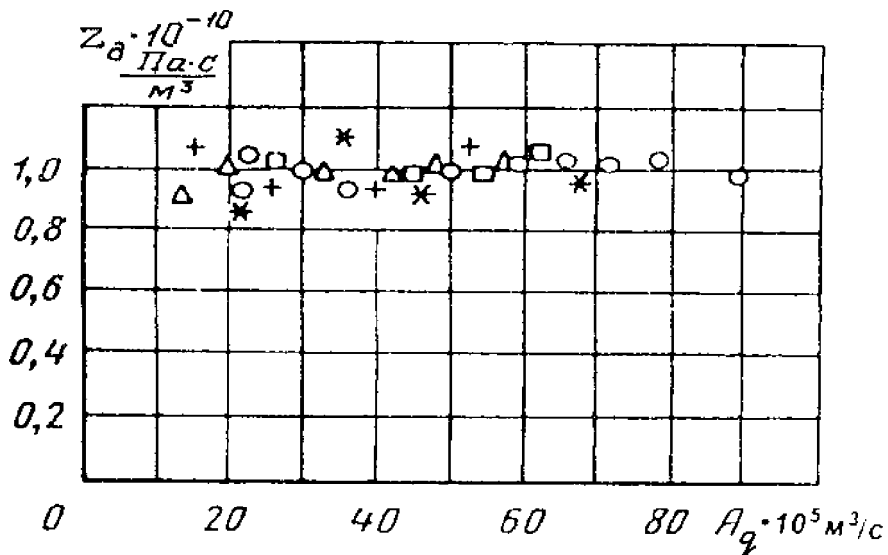


Рис. 1.2.4. Зависимость импеданса образца из материала МР от амплитуды и частоты колебаний расхода: Δ - 200 Гц; \square - 300 Гц; \circ - 400 Гц; $+$ - 500 Гц; $*$ - 600 Гц

Длительные испытания пористого дросселя ($\Pi=0,3$, $d_{нк}=0,05$ мм, $d_0=3,8$ мм, $l_0=10$ мм) на стенде пульсирующих давлений показали, что его характеристики при периодическом движении керосина (при перепаде давления с амплитудой $A_{\Delta p}=10 \cdot 10^5$ Па и частоте 20 Гц) неизменны.

По результатам проведенных испытаний можно сделать вывод о том, что дроссели из МР целесообразно применять в устройствах, работающих в непроточных и малопроточных режимах, каковыми являются пневмогидравлические измерительные цепи.

1.3. Выбор параметров подводящего канала акустического зонда без корректирующего элемента

В результате проведенных авторами исследований установлено, что при достаточно большом коэффициенте диссипации волноводного канала можно реализовать равномерную АЧХ измерительной цепи в ограниченном диапазоне частот без введения КЭ. Из решения уравнения (1.2.1) с учетом граничного условия, определяемого полостью датчика, получим выражение для АЧХ цепи без КЭ:

$$\left| \frac{p_2}{p_0} \right| = \left| \left[ch\bar{\Gamma}l + j \frac{\pi}{2} \frac{1}{Z'_e} \bar{\omega} \bar{V} sh\bar{\Gamma} \right]^{-1} \right|. \quad (1.3.1)$$

С использованием (1.3.1) можно выбрать параметры измерительной цепи, при которых обеспечивается равномерная в пределах заданного допуска $\pm \Delta_{дон}$ передача сигнала в максимально возможном для данной цепи

диапазоне частот $\bar{\omega} \in [0, \bar{\omega}_{нб}]$. Для этого проведены расчеты и построены графики (рис. 1.3.1) в диапазоне изменения относительного объема $\bar{V} = 0,01 \dots 200$ для жидкостной рабочей среды и наибольших допустимых погрешностях $\Delta_{дон} = \pm 0,1; \pm 0,2$.

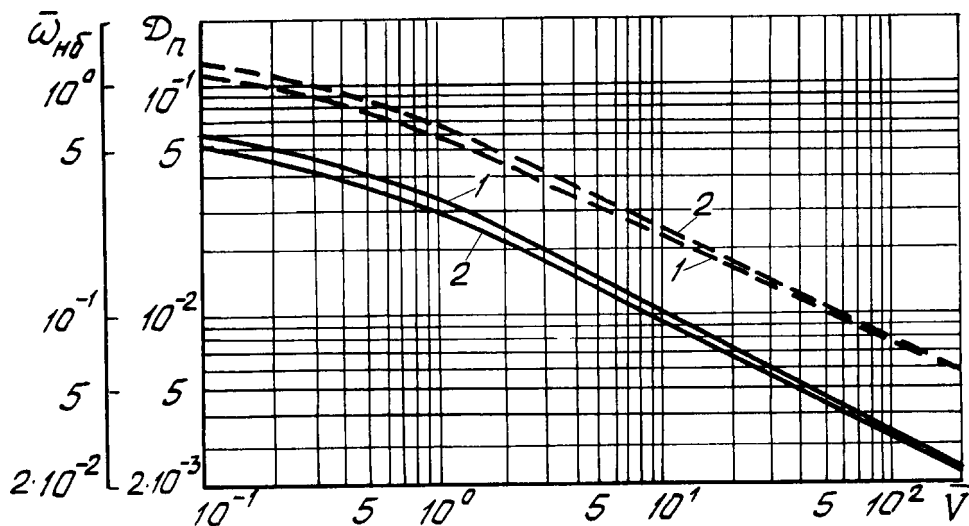


Рис. 1.3.1. Зависимость коэффициента диссипации канала D_n (—) и наибольшей частоты $\bar{\omega}_{нб}$ (---) передачи сигнала без динамического искажения от относительного объема полости датчика давления при различных допустимых погрешностях: 1 – $\Delta_{дон} = \pm 0,1$; 2 – $\Delta_{дон} = \pm 0,2$

Из приведенных графиков следует, что чем меньше $\Delta_{дон}$ и \bar{V} , тем больше должен быть требуемый коэффициент диссипации канала D_n для обеспечения равномерной АЧХ цепи в диапазоне $\bar{\omega} \in [0, \bar{\omega}_{нб}]$. При расчете каналов динамического давления обычно заданы: рабочая среда, приведенный объем полости приемника информации V_n и длина канала. Тогда неизвестным параметром является диаметр канала d . Так как d входит в оба безразмерных параметра V_n и D_n , то целесообразно графики на рис. 1.3.1 перестроить, введя новый безразмерный комплекс $\chi_d = D_n / \bar{V} = \pi v l^2 / (4c V_n)$, который не зависит от d (рис. 1.3.2). Для определения d необходимо по исходным данным (ρ, v, c, V_n) рассчитать χ_d и по графику на рис. 1.3.2 определить для соответствующего значения $\Delta_{дон}$ величину D_n , а затем воспользоваться формулой

$$d = \sqrt{v l / (c D_n)}. \quad (1.3.2)$$

Обычно полученный при этом d отличается от диаметра стандартного трубопровода. Поэтому, используя в качестве канала цепи стандартный

трубопровод с диаметром, близким к рассчитанному значению d , следует уточнить длину канала.

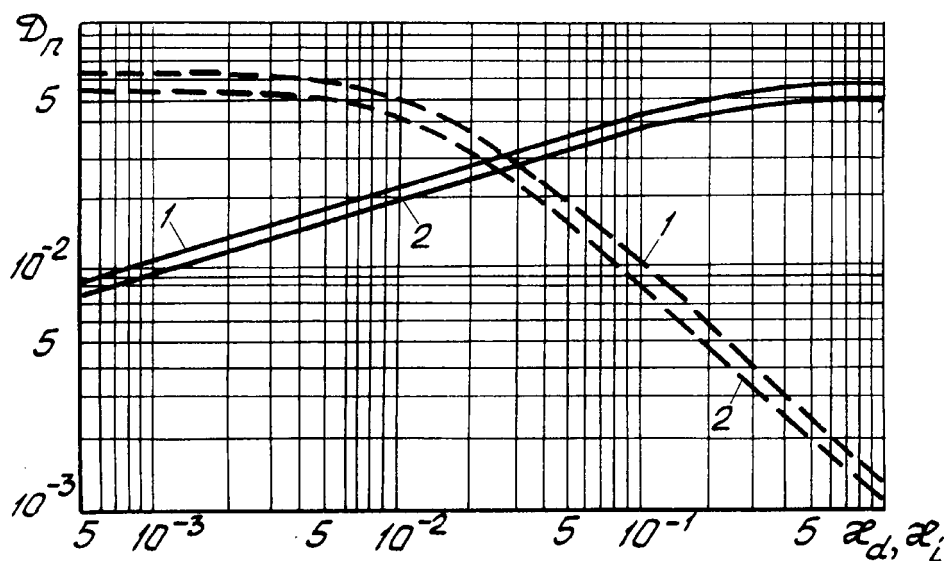


Рис. 1.3.2. Зависимость коэффициента диссипации D_n измерительного канала от безразмерных комплексов χ_d (—) и χ_l (---) при различных допустимых погрешностях: 1 – $\Delta_{\text{дон}} = \pm 0,1$; 2 – $\Delta_{\text{дон}} = \pm 0,2$

Определение уточненной длины канала проводится введением нового безразмерного комплекса $\chi_l = \bar{V} D_n = 4\nu V_n / (\pi c d^4)$ и перестройкой графика на рис. 1.3.1.

Для определения длины канала l по исходным данным (ρ, c, ν, V_n, d) необходимо вычислить χ_l и по графику на рис. 1.3.2 определить для $\Delta_{\text{дон}}$ величину D_n . При известном D_n длина канала рассчитывается по простой формуле

$$l = \frac{c D_n}{\nu} d^2. \quad (1.3.3)$$

Для определения $\omega_{\text{нд}}$ вычисляется $\bar{V} = V_n / (lS)$ и по графику на рис. 1.3.1 находится относительная частота $\bar{\omega}_{\text{нд}}$, а затем по формуле $\omega_{\text{нд}} = \pi c \bar{\omega}_{\text{нд}} / (2l)$ - и размерная ее величина. Если величина $\omega_{\text{нд}}$ оказалась меньше требуемой, то ее увеличение при той же $\Delta_{\text{дон}}$ возможно лишь при повышении \bar{V} , т.е. за счет уменьшения длины или диаметра канала.

Рассмотрим пример выбора параметров гидравлической измерительной цепи. Пусть требуется определить диаметр канала длиной 1 м и наибольшую частоту $\omega_{\text{нд}}$ при $\Delta_{\text{дон}} = \pm 0,1$, если $V_n = 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$; рабочая среда - масло АМГ-10 ($c = 1260 \text{ м/с}$; $\nu = 0,19 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$). Согласно исходным данным безразмерный

параметр $\chi_d = 2,11 \cdot 10^{-3}$ и в соответствии с графиком на рис. 1.3.2 $D_n = 0,0121$. Рассчитанный по формуле (1.3.2) диаметр канала равен $d = 1,1 \cdot 10^{-3}$ м. Близким к рассчитанному диаметру является трубопровод с диаметром $d = 1 \cdot 10^{-3}$ м. В соответствии с формулой $l = cd^2 D_n / v$ уточненная длина канала $l = 0,874$ м. При этом относительный приведенный объем полости чувствительного элемента равен $\bar{V} = 2,05$, а относительная наибольшая частота колебаний, определенная по графику на рис. 1.3.1, составляет $\omega_{нд} = 1087 c^{-1}$ (173 Гц).

Аналогичные графики, построенные применительно к пневматическим измерительным цепям, позволяют определить один из трех параметров $\omega_{нд}$, d, l , когда заданы V, P_{cp}, T .

1.4. Коррекция частотных характеристик акустического зонда сосредоточенными сопротивлениями

1.4.1. Коррекция частотных характеристик зонда одним дросселем

Предположим, что исходная измерительная цепь состоит из волноводного канала и акустической нагрузки в виде первичного преобразователя. Допустим, что с целью «выравнивания» АЧХ измерительной цепи между входом в волновод и его выходом установлен КЭ, описываемый уравнениями акустического четырехполюсника с коэффициентами матрицы передачи A, D, C, D [67] (рис. 1.4.1).

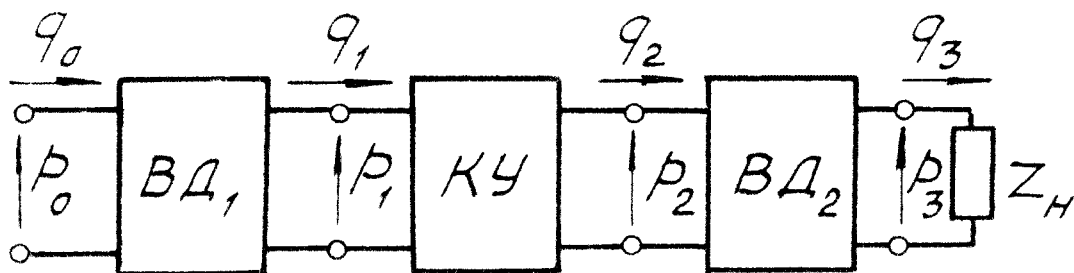


Рис. 1.4.1. Схема пневмогидравлической информационной цепи с корректирующим устройством

КЭ делит волноводный канал на участки длиной l_1 и l_2 , которые, в свою очередь, являются четырехполюсниками VD_1 и VD_2 . Тогда цепь передачи давления может быть представлена последовательным соединением четырехполюсников $VD_1, КУ, VD_2$, причем на выходе из VD_2 подключена акустическая нагрузка с импедансом Z_n . Для дальнейшего анализа примем следующие допущения: потери на трение по длине волновода малы и не

учитываются; КЭ - пассивный, симметричный и может быть составлен из сосредоточенных элементов, параметры которых не зависят от частоты колебаний; коэффициенты матрицы передачи A, B, C, D - действительные величины; на входе в цепь расположен идеальный источник колебаний давления; акустическая нагрузка соответствует закрытому концу канала.

С учетом принятых допущений запишем уравнения, связывающие комплексные амплитуды колебаний давления и объемного расхода рабочей среды в характерных сечениях измерительной цепи:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\omega l_1}{c} & jZ_e \sin \frac{\omega l_1}{c} \\ j \frac{1}{Z_e} \sin \frac{\omega l_1}{c} & \cos \frac{\omega l_1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ q_2 \end{bmatrix}; \quad (1.4.1)$$

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\omega l_2}{c} & jZ_e \sin \frac{\omega l_2}{c} \\ j \frac{1}{Z_e} \sin \frac{\omega l_2}{c} & \cos \frac{\omega l_2}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_3 \\ q_3 \end{bmatrix}.$$

Так как согласно принятому допущению $Z_n = \infty$, то, решив уравнения (1.4.1) с учетом $q_3 = 0$, получим выражение для частотной функции измерительной цепи:

$$\frac{p_3}{p_0} = \left[A \cos \frac{\omega l_1}{c} \cos \frac{\omega l_2}{c} - D \sin \frac{\omega l_1}{c} \sin \frac{\omega l_2}{c} + \right. \\ \left. + j \left(Z_e \sin \frac{\omega l_1}{c} \cos \frac{\omega l_1}{c} + \frac{B}{Z_e} \sin \frac{\omega l_2}{c} \cos \frac{\omega l_2}{c} \right) \right]^{-1}. \quad (1.4.2)$$

Условиями передачи колебаний давления в измерительной цепи без динамического искажения являются:

$$p_3/p_0 = 1; \quad (1.4.3)$$

$$\text{arg}(p_3/p_0) = -\omega l/c. \quad (1.4.4)$$

При выполнении условий (1.4.3) и (1.4.4) колебания давления будут передаваться без искажений амплитуды, но со сдвигом по фазе,

пропорциональным частоте колебаний. Сдвиг по фазе – явление закономерное, обусловленное “транспортным” запаздыванием передаваемых колебаний давления в волноводном канале.

Для определения четырех неизвестных коэффициентов матрицы передачи КЭ, удовлетворяющих равенствам (1.4.3) и (1.4.4), используем дополнительные уравнения, выражающие свойства корректирующего четырехполюсника:

$$AD - BC = 1; \quad (1.4.5)$$

$$A = D. \quad (1.4.6)$$

Решим совместно уравнения (1.4.3) и (1.4.4) с учетом равенства (1.4.2):

$$\left[\left(A \cos \frac{\omega l_1}{c} \cos \frac{\omega l_2}{c} - D \sin \frac{\omega l_1}{c} \sin \frac{\omega l_2}{c} \right)^2 + \left(Z_6 C \sin \frac{\omega l_1}{c} \cos \frac{\omega l_2}{c} - \frac{B}{Z_6} \cos \frac{\omega l_1}{c} \sin \frac{\omega l_2}{c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1; \quad (1.4.7)$$

$$\begin{aligned} & Z_6 C \sin \frac{\omega l_1}{c} \cos \frac{\omega l_2}{c} + \frac{B}{Z_6} \cos \frac{\omega l_1}{c} \sin \frac{\omega l_2}{c} = \\ & = \left(A \cos \frac{\omega l_1}{c} \cos \frac{\omega l_2}{c} - D \sin \frac{\omega l_1}{c} \sin \frac{\omega l_2}{c} \operatorname{tg} \frac{\omega l}{c} \right). \end{aligned} \quad (1.4.8)$$

Подставив выражение (1.4.8) в левую часть равенства (1.4.7) с учетом (1.4.6), будем иметь

$$\left[A^2 \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\omega l}{c} \right) \cos^2 \left(\frac{\omega l}{c} \right) \right) \right]^{\frac{1}{2}} = 1.$$

Из последнего выражения следует, что $A = \pm 1$. Поскольку пассивный КЭ может быть реализован лишь при положительных значениях коэффициентов матрицы передачи, то в качестве решения принимаем $A = 1$. Так как $D = A = 1$, то уравнения (1.4.5) и (1.4.8) соответственно примут вид:

$$BC = 0; \quad (1.4.9)$$

$$\begin{aligned} & Z_6 C \sin \frac{\omega l_1}{c} \cos \frac{\omega l_2}{c} + \frac{B}{Z_6} \cos \frac{\omega l_1}{c} \sin \frac{\omega l_2}{c} = \\ & = \sin \frac{\omega l_1}{c} \cos \frac{\omega l_2}{c} + \cos \frac{\omega l_1}{c} \sin \frac{\omega l_2}{c}. \end{aligned} \quad (1.4.10)$$

Введем обозначение $\bar{l} = l_1 / l$, тогда уравнение (1.4.10) может быть представлено в следующем виде:

$$(1 - B / Z_6) / (Z_6 c - 1) = \operatorname{tg} \left(\omega \bar{l} / c \right) / \operatorname{tg} \left[\omega (1 - \bar{l}) / c \right]. \quad (1.4.11)$$

Согласно принятому допущению, Z_6 , B и C не зависят от частоты колебаний. В этом случае правая часть (1.4.11) не должна зависеть от ω .

Указанное условие выполняется при $\bar{l}_1=0; 0,5; 1$. При длине $\bar{l}_1=0$, соответствующей установке КЭ на входе в цепь, будем иметь $1 - B/Z_6=0$ или $B=Z_6$ и, согласно равенству (1.4.9), $C=0$. Таким образом, при установке КЭ на входе в цепь коэффициенты его матрицы равны $A=1; B=Z_6; C=0; D=1$.

Известно [67], что любой пассивный четырехполюсник может быть представлен замещающим четырехполюсником по Т - образной или П - образной схеме. Для данного варианта ($\bar{l}_1=0$) реализуется П-образная схема. При этом величины импедансов плеч Z_1, Z_2, Z_3 определяются через коэффициенты четырехполюсника A, B, C, D по следующим формулам теории цепей: $Z_1 = B; Z_2 = B/(D-1); Z_3 = B/(A-1)$ или (с учетом значений A, B, C, D) $Z_1 = Z_6; Z_2 = \infty; Z_3 = \infty$. Величины Z_2 и Z_3 соответствуют разрывам цепи, поэтому КЭ, согласно правилам динамических аналогий [67], реализуется в виде сосредоточенного дросселирующего элемента (с сопротивлением, равным Z_6), установленного на входе в волновод (рис. 1.4.2,а).

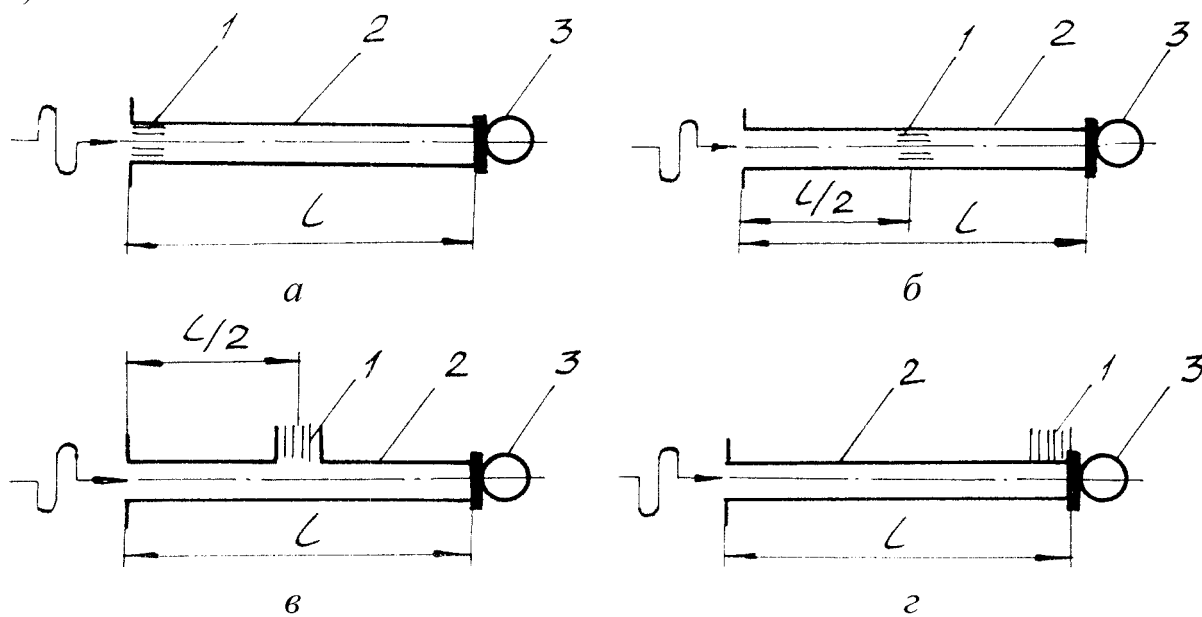


Рис. 1.4.2. Схемы пневмогидравлических измерительных цепей с корректирующими дросселирующими элементами: 1 – дроссель с активным сопротивлением $\text{Re} Z_a$, равным: Z_a – для схемы а; $2Z_a$ – для схемы б; $Z_a/2$ – для схемы в; Z_a – для схемы г; 2 – подводный канал; 3 – акустическая нагрузка

При длине $\bar{l}_1=0,5$, соответствующей установке КЭ на середине волновода, из равенства (1.4.11) будем иметь

$$1 - B/Z_6 = Z_6 C - 1. \quad (1.4.12)$$

Уравнения (1.4.9) и (1.4.12) имеют два решения, при которых коэффициенты матрицы передачи КЭ таковы:

1. $A = 1, B = 2Z_6, C = 0, D = 1;$
2. $A = 1, B = 0, C = 2/Z_6, D = 1.$

Первое решение можно реализовать четырехполюсником по П - образной схеме с $Z_1 = 2Z_6$ и разрывами в параллельных плечах (рис. 1.4.2,б). Второе решение реализуется четырехполюсником по Т-образной схеме с импедансами плеч: $Z_2 = (A-1)/C = 0; Z_3 = (D-1)/C; Z_4 = 1/C = Z_6/2$. Согласно [64] такая схема эквивалентна цепи с шунтирующим дросселем (с сопротивлением, равным Z_6), расположенным на середине волновода (рис. 1.4.2,в).

При длине $\bar{l}_1 = 1$, соответствующей установке КЭ на выходе из цепи, из равенства (1.4.11) получим: $Z_6 C - 1 = 0$ и $C = 1/Z_6$. Тогда из уравнения (1.4.9) следует, что $B = 0$. Коэффициенты матрицы КЭ для этого случая таковы: $A = 1, B = 0, C = 1/Z_6, D = 0$. КЭ реализуется в виде шунтирующего дросселя, расположенного на выходе из измерительной цепи (рис. 1.4.2,г). Необходимо отметить, что последняя схема подключения КЭ является известной.

1.4.2. Коррекция частотных характеристик зонда двумя дросселями

Установка дросселя коррекции на входе в волновод или на его середине в случае контролирования параметров загрязненных рабочих сред может привести к засорению дросселя. Менее подвержены засорению дроссели, установленные на выходе из волновода. Однако анализ этих схем коррекции показывает, что приемлемая динамическая точность устройства достижима при значительной величине присоединенной емкости. Кроме того, если применен датчик давления с небольшим объемом динамической камеры, то будет засоряться и сам датчик, что может привести к отказу измерительной цепи. Поэтому целесообразно разрабатывать схему коррекции АЧХ измерительной цепи, в которой корректирующий дроссель располагался бы на выходе из волновода, что обеспечивало бы защиту датчика давления от засорения.

Для анализируемой измерительной цепи (рис. 1.4.3) при принятых в разделе 1.4.1 допущениях комплексные амплитуды колебаний давления и объемного расхода в характерных сечениях связаны соотношениями [67]:

для волновода

$$p_0 = p_1 \cos \frac{\omega l}{c} + jZ_6 q_1 \sin \frac{\omega l}{c}, \quad (1.4.13)$$

для дросселя коррекции, установленного на выходе из волновода

$$p_1 = p_2 + R_0 q_1; \quad q_1 = q_2, \quad (1.4.14)$$

для акустической нагрузки и КЭ

$$q = q_3 + q_4; \quad q_3 = Y p_3; \quad p_2 = p_3 = p_4; \quad q_4 = Y_{кэ} p_4. \quad (1.4.15)$$

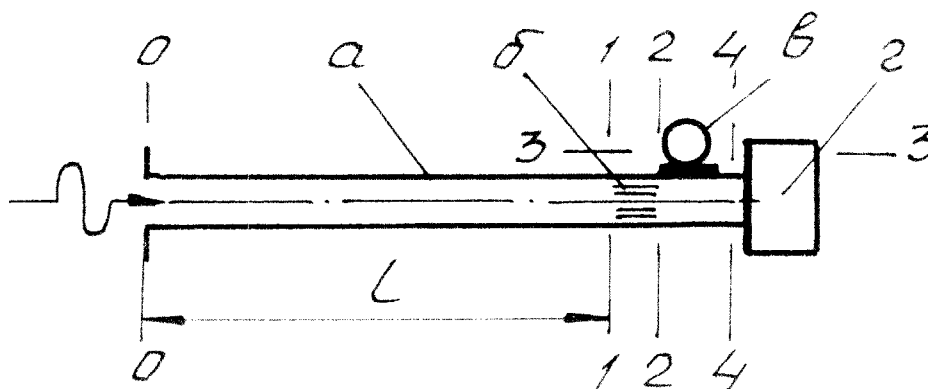


Рис. 1.4.3. Расчетная схема измерительной цепи с корректирующим элементом: а – волновод; б – дроссель волновода; в – акустическая нагрузка; z – корректирующий элемент

Предполагая, что акустическая проводимость нагрузки имеет емкостный характер, можно утверждать, что p_3 является параметром, воспринимаемым чувствительным элементом измерительной цепи. Проводимость КЭ представим через действительную и мнимую части:

$$Y_{кэ} = Re Y_{кэ} + j Im Y_{кэ}. \quad (1.4.16)$$

Тогда, решив систему уравнений (1.4.13)- (1.4.16) относительно p_3/p_0 , получим:

$$p_3/p_0 = (M + jN)^{-1}, \quad (1.4.17)$$

где
$$M = (1 + R_0 Re Y_{кэ}) \cos \frac{\omega l}{c} - Z_6 \left(\frac{V_n \omega}{\rho c^2} + Im Y_{кэ} \right) \sin \frac{\omega l}{c};$$

$$N = \left(R_0 \frac{V_n \omega}{\rho c^2} + R_0 Im Y_{кэ} \right) \cos \frac{\omega l}{c} + Z_6 Re Y_{кэ} \sin \frac{\omega l}{c}. \quad (1.4.18)$$

С учетом равенства (1.4.17) уравнения (1.4.3) и (1.4.4) можно преобразовать к виду

$$M^2 + N^2 = 1, \quad N/M = tq(\omega l/c). \quad (1.4.19)$$

Решив уравнения (1.4.19) относительно M и N , будем иметь

$$M = \pm \cos \frac{\omega l}{c}; \quad N = \pm \sin \frac{\omega l}{c}. \quad (1.4.20)$$

Исследование этих решений показало, что лишь при положительных значениях M и N могут быть реализованы пассивные КЭ. Подставив положительные величины M и N в уравнения (1.4.18) и решив их относительно $ReY_{кэ}$ и $ImY_{кэ}$, получим:

$$ReY_{кэ} = \frac{Z_6}{R_0^2 ctq \frac{\omega l}{c} + Z_6^2}; \quad ImY_{кэ} = \frac{R_0 ctq \frac{\omega l}{c}}{R_0^2 ctq \frac{\omega l}{c} + Z_6^2} - \frac{V_n \omega}{\rho c^2}. \quad (1.4.21)$$

Из анализа выражения $ImY_{кэ}$ ясно: КЭ должен иметь на входе параллельно включенную полость с отрицательной емкостью, что не реализуется в практике. Следовательно, наилучшим образом можно скорректировать частотную характеристику лишь для волновода с акустической нагрузкой, имеющей нулевой объем. Имея в виду, что входной импеданс КЭ равен $Z_{кэ} = 1/Y_{кэ}$, определим с учетом $V_n = 0$ действительную и мнимую его части:

$$ReZ_{кэ} = Z_6; \quad ImZ_{кэ} = R_0 ctq \frac{\omega l}{c}.$$

Тогда будем иметь

$$Z_{кэ} = Z_6 - jR_0 ctq \frac{\omega l}{c}. \quad (1.4.22)$$

Из анализа выражения (1.4.22) ясно, что $Z_{кэ}$ соответствует входному импедансу заглушенного с одного конца трубопровода длиной l , на входе которого установлен сосредоточенный дроссель. При этом волновое сопротивление КЭ $Z_{6.кэ}$ должно быть равно R_0 , а сопротивление дросселя КЭ должно быть равно Z_6 . Полученная таким образом измерительная цепь с КЭ представляет собой последовательное соединение волновода и трубопровода одинаковой длины, на стыке которых установлены сосредоточенные дроссели. Сопротивление дросселя на выходе из волновода (перед нагрузкой) равно волновому сопротивлению трубопровода КЭ, а сопротивление дросселя на входе в трубопровод КЭ равно волновому сопротивлению волновода (рис. 1.4.4). Согласно выражению $Z_{6.кэ} = \rho c / S_{кэ}$, где $S_{кэ}$ - площадь поперечного сечения трубопровода КЭ, большему сопротивлению R_0 соответствуют меньшая площадь $S_{кэ}$ и, следовательно, меньшие габариты КЭ.

При малых диаметрах трубопровода КЭ потери на трение по длине трубопровода могут оказать существенное влияние на динамическую точность измерительной цепи. Если в качестве акустической нагрузки использован датчик давления с определенной податливостью мембраны чувствительного элемента, то приведенный объем его рабочей полости

$V_n \neq 0$. Это в свою очередь вызывает появление динамической погрешности измерительной цепи.

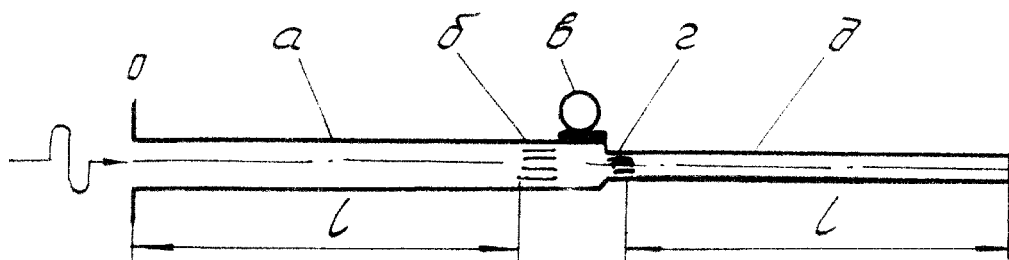


Рис. 1.4.4. Схема цепи с корректирующим элементом в виде заглушенного со свободного конца трубопровода и дросселя на входе: *a* – волновод; *б* – дроссель волновода; *в* – акустическая нагрузка; *г* – дроссель корректирующего элемента; *д* – трубопровод корректирующего элемента

В качестве примера на рис. 1.4.5 приведена АЧХ измерительной цепи с двумя корректирующими дросселями.

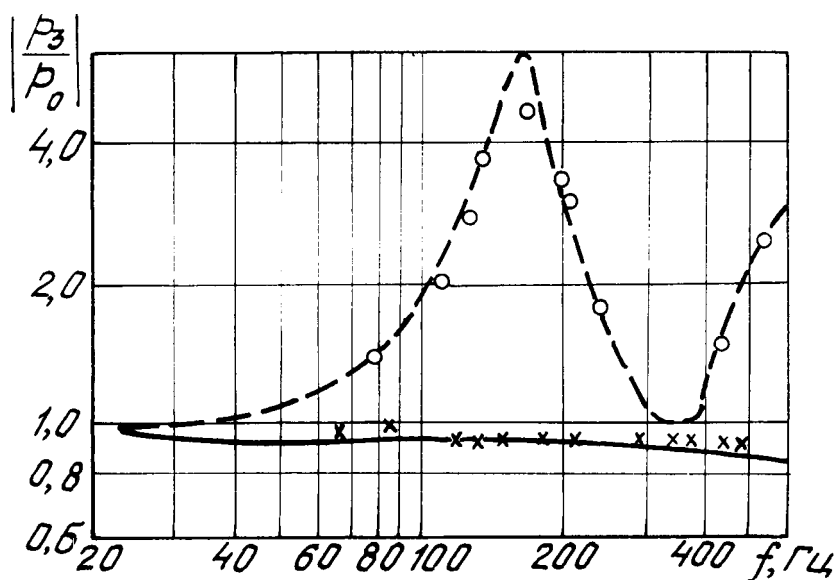


Рис. 1.4.5. АЧХ измерительной цепи ($l = 0,44$ м; $d = 3,95$ мм; $D_n = 1,2 \cdot 10^{-3}$): — — — — — расчет; \circ — эксперимент без корректирующего элемента; - - - - - расчет; \times — эксперимент с двумя дросселями коррекции из МР ($l_d = 10$ мм; $d_d = 3,95$ мм; $d_{нк} = 0,09$ мм; $\Pi = 0,83$)

При окончательном выборе параметров КЭ необходимо учитывать влияние трения, податливости мембраны чувствительного элемента преобразователя и инерционности дросселирующих элементов на степень неравномерности АЧХ измерительной цепи.

1.5. Коррекция частотных характеристик зонда элементами с распределенными параметрами

В предыдущих разделах рассмотрена коррекция АЧХ измерительной цепи сосредоточенными дросселями при постоянном среднем давлении. При изменении среднего давления изменяются кинематическая вязкость рабочей среды и, как следствие, сопротивление дросселей, что приводит к динамической погрешности измерения пульсаций давления выше допустимой нормы. В данном разделе изложен метод коррекции АЧХ измерительной цепи элементами с распределенными параметрами, при которых чувствительность ее характеристики к изменению среднего давления существенно ниже.

1.5.1. Пористый поглотитель колебаний

Компактные цепи передачи динамического давления могут быть реализованы при применении КЭ в виде каналов, заполненных пористым материалом, например МР [4,16,67] (рис. 1.5.1). При соответствующем выборе параметров пористого элемента входной импеданс КЭ может быть близок к волновому сопротивлению подводящего волновода, при котором обеспечивается равномерная АЧХ цепи.

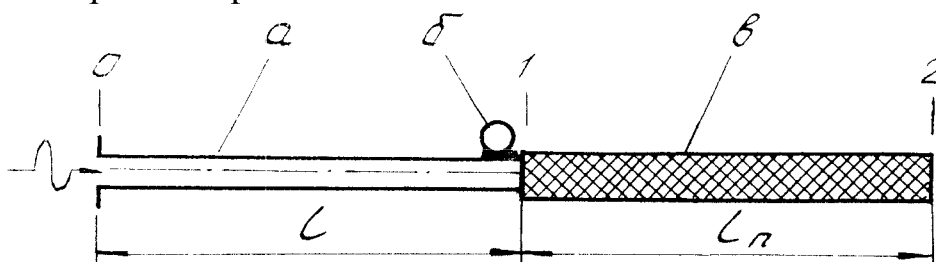


Рис. 1.5.1. Расчетная схема измерительной цепи с КЭ в виде пористого поглотителя колебаний: а – подводящий канал; б – первичный преобразователь; в – поглотитель колебаний из пористого материала МР

При расчете КЭ полагается, что в пористом материале реализуется квазистационарный неустановившийся режим ламинарного движения рабочей среды. Допустимость квазистационарности модели движения среды в пористом элементе подтверждена экспериментальными исследованиями дросселирующих элементов, выполненных из МР. При принятом допущении колебания давления и расхода в пористом КЭ связаны зависимостями, выведенными из решения дифференциальных уравнений в записи И.А. Чарного [63] с коэффициентом гидравлических потерь $2a = \Delta_{лн} (1 - \Pi)^2 v / (\Pi^2 d_{нк}^2)$. При этом коэффициент распространения волн и волновое сопротивление КЭ могут быть определены из выражения

$$\Gamma_n = \delta_n + j\varepsilon_n; \quad Z'_{\epsilon,n} = \rho c^2 (\delta_n + j\varepsilon_n) / (j\omega S_n), \quad (1.5.1)$$

$$\text{где } \delta_n = \frac{\omega}{c} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2a}{\omega} \right)^2} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad (1.5.2)$$

$$\varepsilon_n = \frac{\omega}{c} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2a}{\omega} \right)^2} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}},$$

S_n – площадь поперечного (живого) сечения пористого канала. АЧХ измерительной цепи с пористым КЭ рассчитывают с учетом (1.5.1), (1.5.2) по формуле:

$$|p_1/p_0| = \left| \left[ch\Gamma + \frac{\bar{S}_n}{\bar{Z}'_{\epsilon,n}} th(\bar{\Gamma}_n \bar{l}_n) sh\bar{\Gamma} \right]^{-1} \right|, \quad (1.5.3)$$

$$\text{где } \bar{Z}'_{\epsilon,n} = \bar{\delta}_n + j\bar{\varepsilon}_n; \quad \bar{\Gamma}_n = \frac{\pi}{2} \bar{\omega} (\bar{\delta}_n + j\bar{\varepsilon}_n); \quad \bar{\delta}_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2K_n D_n}{\pi \bar{\omega}} \right)^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$\bar{\varepsilon}_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2K_n D_n}{\pi \bar{\omega}} \right)^2} + 1 \right]^{\frac{1}{2}};$$

$K_n = \Delta_{\text{лн}} (1 - \Pi)^2 / (\Pi^2 \bar{d}_{\text{пк}}^2)$ – коэффициент структуры материала МР; $\bar{d}_{\text{пк}}$ – относительный диаметр проволоки МР; $\bar{S}_i = S_n / S$ – относительная площадь поперечного сечения пористого канала; $\bar{l}_n = l_n / l$ – относительная длина пористого канала.

Так как одним из необходимых условий равенства входного импеданса поглотителя и волнового сопротивления подводящего канала является равенство их проходных сечений, в дальнейшем будем полагать $\bar{S}_i = 1$. Анализ АЧХ измерительной цепи с пористым КЭ показал, что при постоянных значениях структуры пористого материала K_i и \bar{l}_i существует оптимальное значение коэффициента диссипации волновода D_i , при котором достигается наибольшая частота равномерного (в пределах заданного допуска $\Delta_{\text{дон}}$) пропускания колебаний давления. С использованием зависимости (1.5.3) и разработанного алгоритма рассчитана на ПК номограмма (рис. 1.5.2), позволяющая определить диаметр подводящего канала d и параметры пористого КЭ ($l_i, \bar{l}_i, d_{i\epsilon}$). Для этого при заданных $\Delta_{\text{дон}}, l, \bar{\omega}_{i\delta}$ и параметрах рабочей среды выбирают коэффициент K_n , для которого

построена номограмма, рассчитывают относительную частоту $\bar{\omega}_{i\delta}$ и по номограмме (см. рис. 1.5.2) находят D_i и l_i . Диаметр волновода определяют, как и в случае капиллярного КЭ. Затем задают диаметр проволоки МР $d_{i\epsilon}$, рассчитывают $\bar{d}_{i\epsilon}$ и по формуле $\Pi = \left(1 + \sqrt{K_n \bar{d}_{i\epsilon}^2 / \Delta_{лн}}\right)^{-1}$ определяют пористость МР. При известной пористости находят диаметр пористого канала $d_i = d / \sqrt{\bar{I}}$.

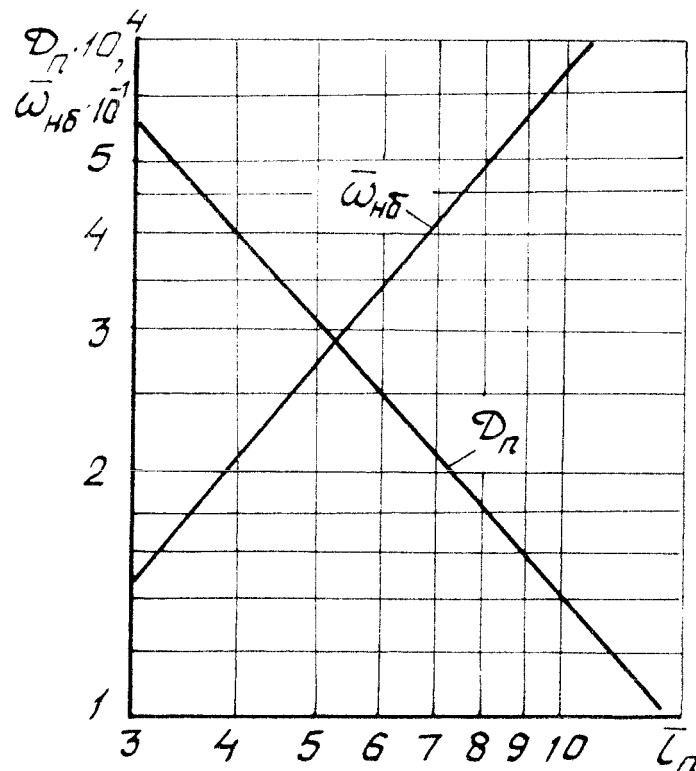


Рис. 1.5.2. Зависимость требуемого коэффициента диссипации волноводного канала и наибольшей частоты $\bar{\omega}_{нб}$ равномерного (в пределах $\Delta_{дон} = \pm 0,2$) пропускания колебаний давления от относительной длины пористого КЭ измерительной цепи при $K_n = 2000$

В качестве примера рассчитан пористый КЭ для измерительной цепи с жидкостной рабочей средой. Так как полученный диаметр канала поглотителя d_n несущественно отличается от диаметра волновода $d=4$ мм, было принято $d_n = d$. При этом повышенный коэффициент отражения способствует увеличению модуля частотной функции цепи, компенсируя затухание волн в подводящем канале.

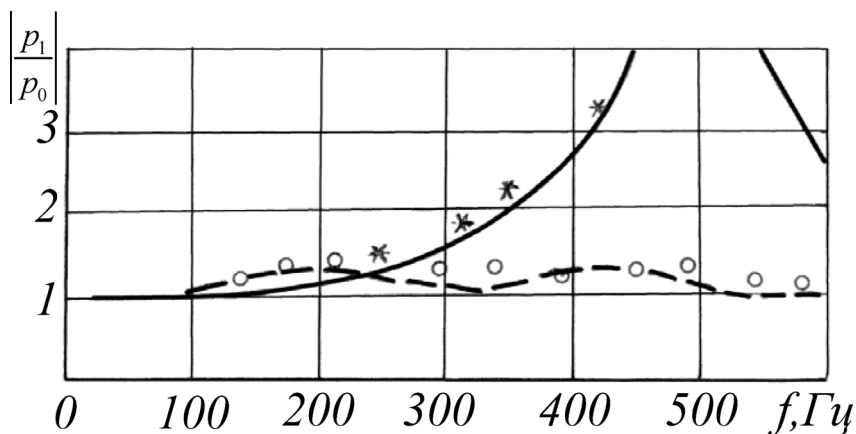


Рис. 1.5.3. АЧХ измерительной цепи с волноводом ($d = 4$ мм, $l = 0,6$ м), датчиком ЛХ-412/60, рабочая среда - масло АМГ-10: — - расчет; *- - эксперимент без КЭ; — — — - расчет; o - эксперимент с пористым КЭ ($d_n=4$ мм; $l_n=0,8$ м; $d_{нк}=0,09$ мм; $\Pi=0,9$)

Из графиков, представленных на рис. 1.5.3, следует, что экспериментальные данные подтверждают расчетные зависимости, определенные при среднем уровне 4 МПа и амплитудах колебаний давления на входе в измерительную цепь (0,2...0,5) МПа.

1.5.2. Набор капиллярных каналов в цепи с температурно-неоднородным подводящим каналом

Теоретическое исследование частотных характеристик акустических зондов проводится на базе математической модели пневматической измерительной цепи, разработанной при следующих допущениях: объект испытаний по отношению к измерительному устройству представляет собой источник колебаний давления; потери энергии колебаний газа в подводящем канале и капиллярах учитываются в соответствии с высокочастотной теорией; температура газа по длине волновода, начиная с входа, распределена в общем случае по экспоненциальному закону; податливость чувствительного элемента датчика давления учитывается приведенным объемом; капилляры в пучке акустически однородны и имеют одинаковые диаметры (рис. 1.5.4) [30,32,67].

Представив температурно - и геометрически - неоднородные участки измерительной цепи в виде последовательного соединения однородных элементов, сколь угодно малой длины, можно выразить при принятых допущениях связь между комплексными амплитудами давления и объемного расхода по концам элементов формулами

$$\begin{aligned}
 p_{i1} &= p_{i2} \operatorname{ch} \Gamma_i l_i + Z_i q_{i2} \operatorname{sh} \Gamma_i l_i; \\
 q_{i1} &= \frac{1}{Z_i} p_{i2} \operatorname{sh} \Gamma_i l_i + q_{i2} \operatorname{ch} \Gamma_i l_i,
 \end{aligned}
 \tag{1.5.4}$$

где p_{i1} , q_{i1} - комплексные амплитуды колебаний давления и объемного расхода на входе; p_{i2} , q_{i2} - комплексные амплитуды колебаний давления и объемного расхода на выходе; Z_i - волновое сопротивление; Γ_i - коэффициент распространения волн на единицу длины; l_i - длина i -го участка измерительной цепи; i - индекс, принимающий значения $i = 1, 2, \dots, I$ - для неоднородного подводящего канала, $i = \kappa 1$ - для первого пучка капилляров; $i = \kappa 2$ - для второго пучка капилляров; I - число разбиений неоднородного подводящего канала.

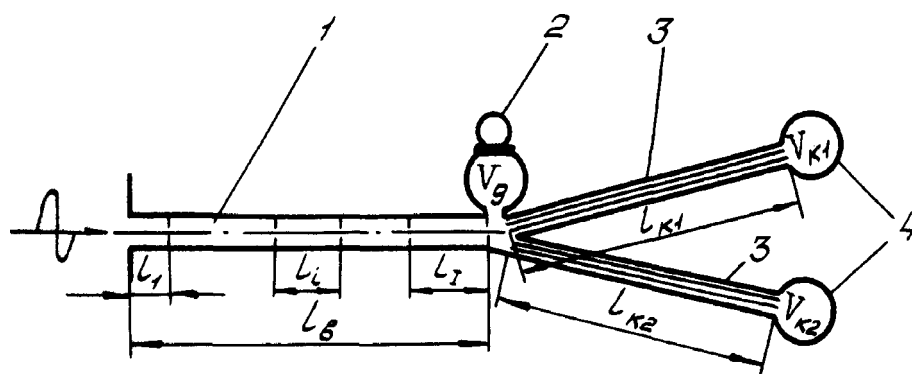


Рис. 1.5.4. Расчетная схема акустического зонда для измерения пульсаций давления: 1 – подводящий канал; 2 – преобразователь давления; 3 – пучок капилляров; 4 - концевые емкости

Волновое сопротивление и коэффициент распространения волн в соответствии с высокочастотной теорией [42] определяются по формулам:

$$Z_i = \sqrt{\frac{Z_i}{Y_i}}; \tag{1.5.5}$$

$$\Gamma_i = \sqrt{Z_i Y_i}, \tag{1.5.6}$$

где $Z_i = R_i + j\omega L_i$ - последовательный импеданс, $Y_i = G_i + j\omega C_i$ - полная акустическая проводимость; R_i - активное сопротивление, L_i - акустическая индуктивность, G_i - параллельная проводимость, C_i - акустическая емкость на единицу длины i -го участка цепи. Параметры R_i , L_i , G_i , C_i - рассчитываются по известным формулам:

$$R_i = \frac{1}{2} L_i \sqrt{\omega \omega_{vi}}; \quad L_i = \frac{\rho_i}{S_i}; \tag{1.5.7}$$

$$G_i = \frac{\kappa - 1}{2\sqrt{Pr}} C_i \sqrt{\omega \omega_{vi}}; C_i = \frac{S_i}{\kappa P_{cp}}, \quad (1.5.8)$$

где $\omega_{vi} = 8\pi\nu_i/S_i$ - характеристическая частота колебаний; ν_i - кинематическая вязкость; ρ_i - плотность газа; S_i - площадь поперечного сечения i -го участка цепи. Использование высокочастотной теории распространения волн в канале в области нижних частот приводит к заниженному учету потерь энергии колебаний по длине канала. Поэтому в низкочастотной области выражение для расчета R_i принято по квазистационарной модели

$$R_i = \frac{8\pi\rho_i\nu_i}{S_i^2}, \quad (1.5.9)$$

а величины L_i , C_i равны соответствующим значениям высокочастотной модели и $G_i = 0$. Критерием разграничения низкочастотной и высокочастотной областей расчетной модели является ω_{vi} . Критическая частота колебаний, выше которой используется высокочастотная модель, определяется из равенства [60]

$$\omega_{кр} = 4\omega_{vi}. \quad (1.5.10)$$

Уравнения граничных условий для концевых сечений подводщего канала выводятся, исходя из равенства давлений и неразрывности потока газа:

$$p_{12} = p_\partial = p_{\kappa 11} = p_{\kappa 21}, \quad (1.5.11)$$

$$q_{12} = q_\partial + n_1 q_{\kappa 11} + n_2 q_{\kappa 21}, \quad (1.5.12)$$

где p_∂ , q_∂ - комплексные амплитуды колебаний давления и объемного расхода на входе в полость чувствительного элемента датчика давления; n_1 , n_2 - число капилляров в первом и втором пучке. Комплексные амплитуды p_∂ , q_∂ связаны зависимостью:

$$q_\partial = Y_\partial \cdot p_\partial, \quad (1.5.13)$$

где $Y_\partial = jV_\partial\omega/(\kappa P_{cp})$ - входная акустическая проводимость датчика; V_∂ - приведенный объем полости чувствительного элемента датчика.

Уравнения граничных условий для концевых сечений капилляров записываются в форме:

$$q_{\kappa 12} = (Y_{\kappa 12}/n_1) p_{\kappa 12}; q_{\kappa 22} = (Y_{\kappa 22}/n_2) p_{\kappa 22}, \quad (1.5.14)$$

где $Y_{\kappa 12} = jV_{\kappa 1}\omega/(\kappa P_{cp})$, $Y_{\kappa 22} = jV_{\kappa 2}\omega/(\kappa P_{cp})$ - акустические проводимости концевых емкостей первого и второго пучка капилляров.

Из решения системы уравнений (1.5.4)...(1.5.14) может быть определена частотная функция акустической цепи, связывающая

комплексные амплитуды колебаний давления в полости датчика давления p_d и на входе в измерительную цепь p_{11} (в объекте испытания).

Для общности анализа частотных характеристик измерительной цепи введем следующие безразмерные параметры:

$\bar{p}_i = p_i / (\kappa P_{cp})$, $\bar{q}_i = q_i / (c_i S_i)$ – относительные комплексные амплитуды колебаний давления и объемного расхода в i -ом сечении измерительной цепи;

$D_{ni} = v_i l_i / (c_i d_i^2)$ – коэффициент диссипации волн в i -ом участке подводющего канала;

$\bar{T}_i = T_i / T_I$ – относительная температура газа в i -ом участке подводющего канала;

$\bar{V}_d = V_d / (l_i S_i)$ – относительный объем полости чувствительного элемента датчика давления;

$\bar{V}_{\kappa 1} = V_{\kappa 1} / (l_i S_i)$, $\bar{V}_{\kappa 2} = V_{\kappa 2} / (l_i S_i)$ – относительные объемы концевых емкостей первого и второго пучка капилляров;

$\bar{d}_{\kappa n} = d_{\kappa n} / d_I$ – относительный диаметр капилляров;

$\bar{l}_{\kappa 1} = l_{\kappa 1} / l_i$, $\bar{l}_{\kappa 2} = l_{\kappa 2} / l_i$ – относительные длины капилляров первого и второго пучка;

$\bar{\omega} = \omega / \omega_0$ – относительная частота колебаний;

где $\omega = \pi c_i / (2l_i)$ – собственная частота колебаний газа в замкнутом с одного конца подводющем канале; $c_i = \sqrt{\kappa RT_I}$ – скорость звука в газе в i -ом участке подводющего канала; T_i , T_I – температуры газа в i -ых и I -ом участках измерительной цепи; R – газовая постоянная; c – скорость звука в газе в подводющем канале; d_i , d_I – диаметры подводющего волновода в i -ых и I -ом сечениях; $d_{\kappa n}$ – диаметр капилляров; $S_i = \pi d_i^2 / 4$ – площадь проходного сечения волновода в I -ом сечении; $l_{\kappa 1}$, $l_{\kappa 2}$ – длины капилляров в первом и втором пучке.

При расчете частотных характеристик измерительной цепи использован импедансный метод. Он заключается в том, что вначале, при движении от конца цепи к началу, рассчитывается последовательно входная акустическая проводимость участков и далее всей цепи, а затем, определив комплексные амплитуды давления и расхода в начальном сечении, рассчитывают при движении в обратном направлении комплексные амплитуды давления и расхода в выделенных сечениях. С учетом введенных безразмерных параметров входные акустические проводимости участков цепи определяются по формулам:

для концевых сечений капиллярных каналов в первом и втором пучках

$$\bar{Y}_{\kappa 12} = j \frac{\pi}{2} \bar{\omega} \bar{V}_{\kappa 1}; \quad \bar{Y}_{\kappa 22} = j \frac{\pi}{2} \bar{\omega} \bar{V}_{\kappa 2}, \quad (1.5.15)$$

для начальных сечений первого и второго пучка капиллярных каналов

$$\bar{Y}_{\kappa 11} = \frac{n_1 ch \bar{\Gamma}_{\kappa 1} + \bar{Z}_{\kappa 1} Y_{\kappa 12} sh \bar{\Gamma}_{\kappa 1}}{\frac{1}{\bar{Z}_{\kappa 1}} sh \bar{\Gamma}_{\kappa 1} + \frac{\bar{Y}_{\kappa 12}}{n_1} ch \bar{\Gamma}_{\kappa 1}},$$

$$\bar{Y}_{\kappa 21} = \frac{n_2 ch \bar{\Gamma}_{\kappa 2} + \bar{Z}_{\kappa 2} Y_{\kappa 22} sh \bar{\Gamma}_{\kappa 2}}{\frac{1}{\bar{Z}_{\kappa 2}} sh \bar{\Gamma}_{\kappa 2} + \frac{\bar{Y}_{\kappa 22}}{n_2} ch \bar{\Gamma}_{\kappa 2}}; \quad (1.5.16)$$

для сечения на входе в полость датчика

$$\bar{Y}_d = j \frac{\pi}{2} \bar{\omega} \bar{V}_d; \quad (1.5.17)$$

для сечения на выходе из подводящего канала

$$\bar{Y}_{12} = \bar{Y}_d + \bar{Y}_{\kappa 11} + \bar{Y}_{\kappa 21}; \quad (1.5.18)$$

для сечений на входе в i -ые участки подводящего канала

$$\bar{Y}_{i1} = \frac{ch \bar{\Gamma}_i + \bar{Z}_i \bar{Y}_{i2} sh \bar{\Gamma}_i}{\frac{1}{\bar{Z}_i} sh \bar{\Gamma}_i + \bar{Y}_{i2} ch \bar{\Gamma}_i} \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad (1.5.19)$$

где $\bar{Y}_{\kappa 12} = Y_{\kappa 2} S_I / (\rho_1 c_1)$, $\bar{Y}_{\kappa 22} = Y_{\kappa 22} S_I / (\rho_1 c_1)$, $\bar{Y}_{\kappa 11} = Y_{\kappa 11} S_I / (\rho_1 c_1)$, $\bar{Y}_{\kappa 21} = Y_{\kappa 21} S_I / (\rho_1 c_1)$, $\bar{Y}_{\kappa 9} = Y_{\kappa 9} S_I / (\rho_1 c_1)$, $\bar{Y}_{i1} = Y_{i1} S_I / (\rho_1 c_1)$, $\bar{Y}_{i2} = Y_{i2} S_I / (\rho_1 c_1)$ - относительные акустические входные проводимости участков цепи в соответствующих индексам сечениях, $Y_{\kappa 11} = p_{\kappa 11} / (n_1 q_{\kappa 11})$, $Y_{\kappa 21} = p_{\kappa 21} / (n_2 q_{\kappa 21})$, $Y_{i1} = p_{i1} / q_{i1}$, $Y_{i2} = p_{i2} / q_{i2}$ - акустические входные проводимости участков цепи в размерных параметрах. Относительные волновые сопротивления и коэффициенты распространения волн i -ых участков в выражениях (1.5.13), (1.5.14) и (1.5.17) определяются по формулам:

$$\bar{Z}_i = \frac{1}{\bar{d}_i^2 \sqrt{\bar{T}_i}} \left[1 - j \frac{32 D_{ni} (\alpha + 0,506 \bar{T}_i)}{\bar{d}_i^2 (\alpha + 0,506) \frac{\pi}{2} \bar{\omega}} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (1.5.20)$$

$$\bar{\Gamma}_i = \frac{l_i}{\sqrt{\bar{T}_i}} \left\{ j \frac{\pi}{2} \left[\frac{32 D_{ni} (\alpha + 0,506 \bar{T}_i)}{\bar{d}_i^2 (\alpha + 0,506)} + j \frac{\pi}{2} \bar{\omega} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

при $\bar{\omega} \leq \frac{64 \bar{T}_i D_{ni}}{\pi \bar{d}_i^2}$,

$$\bar{\Gamma}_i = \frac{l_i}{\sqrt{\bar{T}}} \left\langle \left\{ \left[\frac{\pi}{2} \bar{\omega} \frac{8D_{ni}(\alpha + 0,506\bar{T}_i)}{\bar{d}_i^2(\alpha + 0,506)} \right]^{\frac{1}{2}} + j \frac{\pi}{2} \bar{\omega} \right\} \times \right. \\ \left. \times \left\{ \frac{\kappa - 1}{\sqrt{Pr}} \left[\frac{\pi}{2} \bar{\omega} \frac{8D_{ni}(\alpha + 0,506\bar{T}_i)}{\bar{d}_i^2(\alpha + 0,506)} \right]^{\frac{1}{2}} + j \frac{\pi}{2} \bar{\omega} \right\} \right\rangle^{\frac{1}{2}} \quad (1.5.21)$$

при $\bar{\omega} > 64\bar{T}_i D_{ni} / \pi \bar{d}_i^2$, где $\alpha = 37,4 / T_1$ - постоянный коэффициент, определяемый в соответствии с формулой для расчета динамической вязкости воздуха [39]; $\mu = (37,4 + 0,506T) \cdot 10^7$.

Воспользовавшись формулами (1.5.12) - (1.5.19), согласно импедансному методу определяется входная проводимость всей измерительной цепи Y_{11} , затем при известной комплексной амплитуде $\bar{p}_{11} = p_{11} / (\kappa P_{cp})$ определяется комплексная амплитуда расхода во входном сечении

$$\bar{q}_{11} = \frac{1}{Y_{11}} \bar{p}_{11}.$$

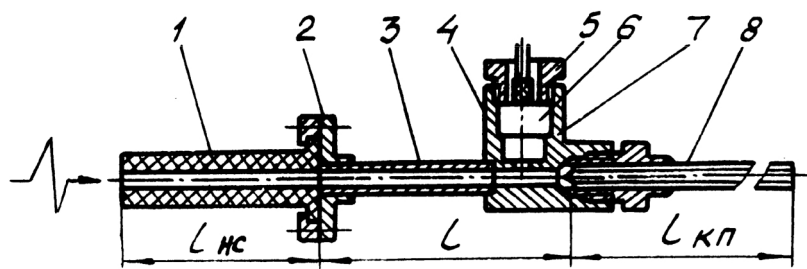
При определенных таким образом величинах q_{11} и p_{11} рассчитываются последовательно при движении в обратном направлении комплексные амплитуды колебаний давления и расхода во всех промежуточных сечениях подводящего канала вплоть до датчика давления по формулам:

$$\bar{p}_{i2} = \bar{p}_{i1} ch \bar{\Gamma}_i \bar{l}_i - \bar{Z}_i \bar{q}_{i1} sh \bar{\Gamma}_i \bar{l}_i; \\ \bar{q}_{i2} = -\frac{1}{Z_i} \bar{p}_{i1} sh \bar{\Gamma}_i \bar{l}_i + \bar{q}_{i1} ch \bar{\Gamma}_i \bar{l}_i; \quad i = 1, 2, \dots, I$$

Так как $\bar{p}_I = \bar{p}_\partial$, то можно определить частотную функцию измерительной цепи с капиллярным корректирующим элементом:

$$W(j\bar{\omega}) = \bar{p}_\partial / \bar{p}_{11}. \quad (1.5.22)$$

Частотная функция измерительной цепи (1.5.22) для заданного газа (κ, Pr) зависит от следующих параметров $\bar{\omega}$, D_n , \bar{V}_∂ , $\bar{V}_{\kappa 1}$, $\bar{V}_{\kappa 2}$, $\bar{d}_{\kappa n}$, $\bar{l}_{\kappa 1}$, $\bar{l}_{\kappa 2}$, n_1 , n_2 . Для анализа частотной функции цепи составлены методика и алгоритм расчета амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик, приведенные в следующей главе.



а



б

Рис. 1.5.5. Конструктивная схема (а) и внешний вид (б) устройства для измерения пульсаций давления с капиллярным КЭ: 1 - керамический насадок; 2 - уплотнительная прокладка; 3 - волновод; 4 - корпус; 5 - гайка; 6 - датчик пульсации давления ДД6-002Т; 7 - уплотнительное кольцо; 8 - пучок, капилляров

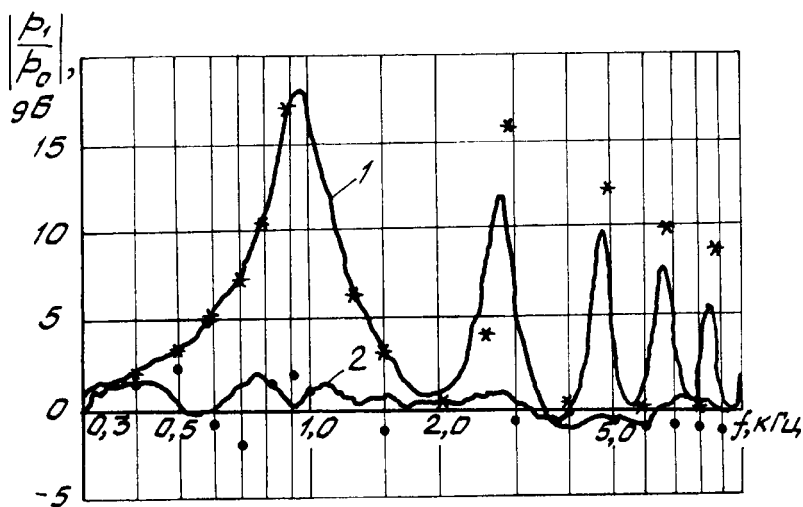


Рис. 1.5.6. АЧХ устройства для измерения пульсаций давления (Рис.. 1.5.5) с керамическим насадком ($d_{нс}=3$ мм; $l_{нс}=40$ мм), волноводом ($d=3$ мм; $l=40$ мм) без КУ (* - расчет; 1 - эксперимент) и с капиллярным КУ ($d_{кп}=0,6$ мм; $l_{кп}=0,4$ м; $N_{кп}=25$ шт.) (• - расчет; 2 - эксперимент) при $P_{ср}=1,01 \cdot 10^5$ Па (абс.) и $T=293$ К

В качестве примера на рис. 1.5.5 приведена конструктивная схема акустического зонда, предназначенного для измерения пульсаций давления в высокотемпературных условиях. Из теоретических и экспериментальных АЧХ зонда (рис. 1.5.6) следует, что неравномерность частотной характеристики измерительной цепи с КЭ не превышает 2 дБ в диапазоне частот до 10 кГц.

2. АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ДАТЧИКОМ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Измерительная цепь дифференциальной схемы должна обеспечивать передачу давления с минимальной динамической погрешностью и фильтрацию динамической составляющей давления, передаваемой в статическую (разгрузочную) полость преобразователя. Гашение динамического давления осуществляется при помощи акустических фильтров. В данном разделе предложены ряд схем фильтров коррекции частотных характеристик измерительных цепей дифференциальной схемы и методы расчета параметров КЭ.

2.1. Низкочастотный акустический фильтр

Акустический фильтр в цепях дифференциальной схемы (рис. 2.1.1) предназначен одновременно для согласования преобразователя с волноводом и выравнивания статического давления на чувствительном элементе [19]. В отличие от традиционных условий использования фильтров в цепях, нагруженных дифференциальными преобразователями, условия согласованного включения АФНЧ практически никогда не выполняются. Кроме того, при использовании АФНЧ в качестве корректирующего элемента входное сопротивление фильтра в полосе гашения должно носить активный характер, что также резко отличает его от фильтров, применяемых при решении классических задач фильтрации сигналов. Обобщенной структурой АФНЧ является Т-образный мостиковый фильтр (рис. 2.1.2), из которого могут быть получены, как частные случаи, простейшие RC - и RL -схемы [19,64,67].

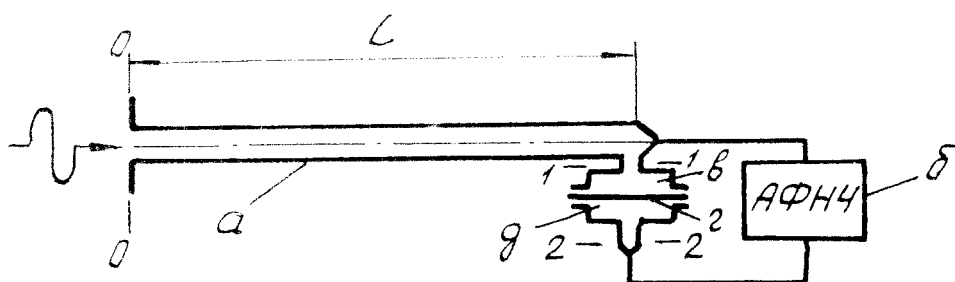


Рис. 2.1.1. Принципиальная схема волноводной цепи дифференциальной схемы: *а* - подводный канал; *б* - акустический фильтр нижних частот; *в* - динамическая камера преобразователя; *г* - чувствительный элемент; *д* - статическая камера преобразователя

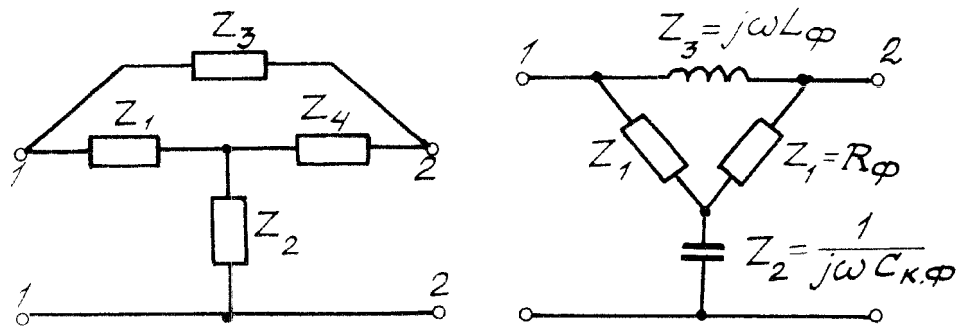


Рис. 2.1.2. Структурная схема (а) и электродинамический аналог (б) акустического Т-образного мостикового АФНЧ

Передаточные свойства цепи с АФНЧ оценивают по зависимости

$$W(j\omega) = (p_1 - p_2) / p_0,$$

которая может быть представлена в виде произведения

$$W(j\omega) = W_1(j\omega)W_2(j\omega), \quad (2.1.1)$$

где

$$W_1(j\omega) = p_1 / p_2, \quad (2.1.2)$$

$$W_2(j\omega) = 1 - p_2 / p_1. \quad (2.1.3)$$

Ясно, что $W_1(j\omega)$ является частотной функцией волновода, нагруженного АФНЧ, а $W_2(j\omega)$ - частотной функцией дифференциального преобразователя, шунтированного АФНЧ.

При выводе формул для частотных функций примем следующие допущения: распределенные потери на трение по длине волновода малы; объемы полостей дифференциального преобразователя малы по сравнению с объемом волноводного канала; АФНЧ представлен одной ячейкой и состоит из линейных сосредоточенных элементов; податливость мембраны чувствительного элемента пренебрежимо мала. В соответствии с принятыми допущениями уравнения для определения функций $W_1(j\omega)$, $W_2(j\omega)$ выражаем в следующем виде:

$$p_0 = p_1 \cos \frac{\omega l}{c} + jZ_6 q_1 \sin \frac{\omega l}{c}; \quad (2.1.4)$$

$$p_1 = A_\phi p_2 + B_\phi q_2; \quad q_1 C_\phi p_2 + D_\phi q_2, \quad (2.1.5)$$

$A_\phi, B_\phi, C_\phi, D_\phi$ - коэффициенты матрицы передачи АФНЧ.

Поскольку входное сопротивление статической полости - величина бесконечно большая, то $q_2 = 0$ и

$$q_1 = C_\phi p_2; \quad p_1 = A_\phi p_2; \quad q_1 = C_\phi p_2. \quad (2.1.6)$$

Из уравнения (2.1.4) с учетом (2.1.6) следует

$$W_1(j\omega) = \frac{p_1}{p_0} = \left[\cos \frac{\omega l}{c} + j \frac{Z_6}{Z_\phi} \sin \frac{\omega l}{c} \right]^{-1}, \quad (2.1.7)$$

где $Z_\phi = A_\phi / C_\phi$ - входное акустическое сопротивление фильтра. На основании (2.1.7) выражение (2.1.3) запишем в виде

$$W_2(j\omega) = (A_\phi - 1) / A_\phi. \quad (2.1.8)$$

При известных $W_1(j\omega)$ и $W_2(j\omega)$ частотную функцию цепи с АФНЧ определяют по формуле (2.1.1). Таким образом, передающие свойства цепи зависят от характеристик АФНЧ и как согласующего устройства, и как элемента, подавляющего высокочастотные колебания на своем выходе.

Рассмотрим структурную схему АФНЧ в виде несимметричного Т - образного четырехполюсника (см. рис. 2.1.2) с коэффициентами матрицы передачи A_ϕ и C_ϕ в виде равенств

$$A_\phi = 1 + Z_1 Z_3 [Z_2 (Z_1 + Z_3 + Z_4) + Z_1 Z_4]^{-1}; \quad (2.1.9)$$

$$C_\phi = (Z_1 + Z_3 + Z_4) [Z_2 (Z_1 + Z_3 + Z_4) + Z_1 Z_4]^{-1}, \quad (2.1.10)$$

где Z_1, \dots, Z_4 - акустические импедансы элементов АФНЧ. С учетом обозначений, принятых на рис. 2.1.2, входное сопротивление и частотную функцию фильтра находим из выражений

$$Z_\phi = 1 / j\omega C_{\kappa\phi} + (R_1 R_2 + j\omega R_1 L_\phi C_{\kappa\phi}) (R_1 + R_2 + j\omega L_\phi)^{-1}; \quad (2.1.11)$$

$$W_2(j\omega) = -\omega^2 R_1 L_\phi C_{\kappa\phi} [R_1 + R_2 - \omega^2 R_1 L_\phi C_{\kappa\phi} + j(\omega R_1 R_2 C_{\kappa\phi} + \omega L_\phi)]^{-1}. \quad (2.1.12)$$

Известно [64], что Т - образный четырехполюсник обладает активным волновым сопротивлением со стороны входа и выхода при $R_1 = R_2 = R_\phi$ и $R_\phi \sqrt{L_\phi / C_{\kappa\phi}}$. С учетом последних равенств и соотношений (2.1.7), (2.1.11), (2.1.12) преобразуем формулу (2.1.1) и представим частотную функцию измерительной цепи в относительных параметрах

$$W(j\bar{\omega}) = W_1(j\bar{\omega}) W_2(j\bar{\omega}), \quad (2.1.13)$$

где

$$W_1(j\bar{\omega}) = \cos \frac{\pi}{2} \bar{\omega} - \left[2\Omega \bar{\omega} + j(\Omega \bar{\omega})^2 \right] \sin \frac{\pi}{2} \bar{\omega} \left[2 - (\Omega \bar{\omega})^2 + j2\Omega \bar{\omega} \right]^{-1} / \bar{R}_\phi;$$

$$W_2(j\bar{\omega}) = -(\Omega \bar{\omega})^2 / \left[2 - (\Omega \bar{\omega})^2 + j2\Omega \bar{\omega} \right]; \quad (2.1.14)$$

$$\Omega = \pi \sqrt{\bar{L}_\phi \bar{V}_{\phi\phi}} / 2; \quad (2.1.15)$$

$\bar{L}_\phi = L_\phi S / (\rho l)$ - относительная индуктивность канала; $\bar{V}_{\dot{e}\dot{o}} = V_{\dot{e}\dot{o}} / (ls)$ - относительный объем камеры фильтра; $V_{кф}$ - приведенный объем камеры фильтра; $\bar{R}_\phi = R_\phi / Z_с$ - относительное сопротивление дросселя фильтра. На основании АЧХ (рис. 2.1.3), рассчитанных по модулю частотной функции (2.1.13), можно сделать вывод о том, что при $\bar{R}_\phi = 1$ достигается наименьшая неравномерность АЧХ цепи. В диапазоне изменения Ω от 2 до 10 наибольшая динамическая погрешность $\Delta_{нд}$ связана с параметром Ω зависимостью

$$\Delta_{нд} = 0,85\Omega^{-1,5}. \quad (2.1.16)$$

Погрешность такой аппроксимации не превышает 3 %. При $\Omega > 30$ АЧХ цепи практически не расслаивается по параметру Ω , что указывает на доминирующую роль $W_2(j\omega)$ в функции $W(j\omega)$. Поэтому при $\Omega > 30$ можно связать граничную частоту $\bar{\omega}_{зр}$ с допустимой неравномерностью $\Delta_{\dot{a}\dot{i}\dot{i}}$ АЧХ цепи: $|W_2(j\omega)| = 1 - \Delta_{дон}$ или

$$(\Omega \bar{\omega}_{зр})^2 / \sqrt{4 + (\Omega \bar{\omega}_{зр})^4} = 1 - \Delta_{дон}. \quad (2.1.17)$$

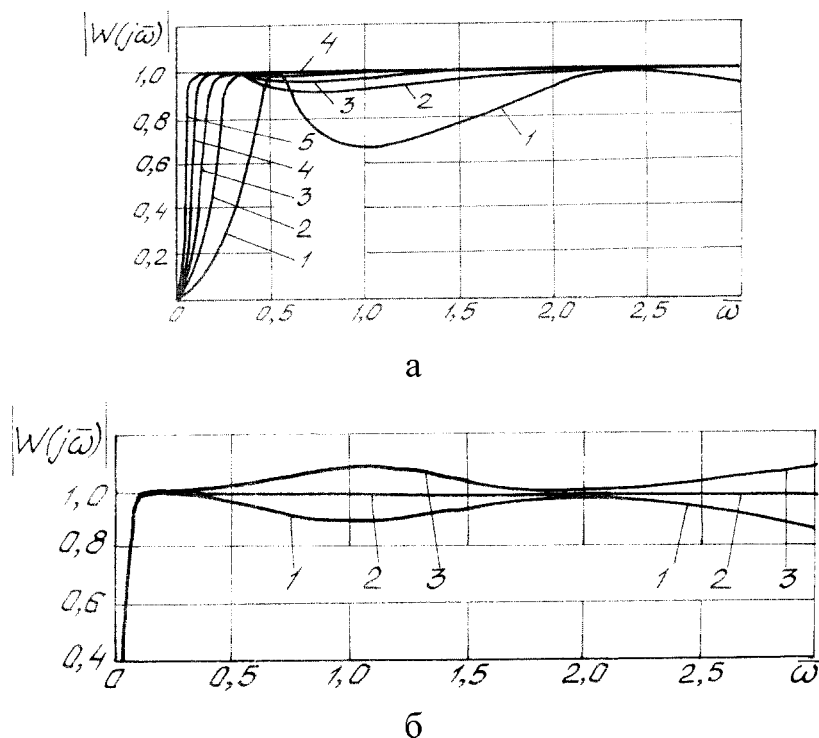


Рис. 2.1.3. АЧХ дифференциальной измерительной цепи с Т-образным мостиковым фильтром при $\bar{R}_\phi = 1$ и различных относительных частотах Ω : 1 - $\Omega = 2$; 2 - $\Omega = 5$; 3 - $\Omega = 10$; 4 - $\Omega = 20$; 5 - $\Omega = 30$ (а) при $\Omega = 30$ и различных относительных сопротивлениях дросселя \bar{R}_ϕ : 1 - $\bar{R}_\phi = 0,9$; 2 - $\bar{R}_\phi = 1,0$; 3 - $\bar{R}_\phi = 1,1$ (б)

Решив уравнение (2.1.17) относительно $\bar{\omega}_{zp}$, определим

$$\bar{\omega}_{zp} = 2(1 - \Delta_{дон}) / \left(\sqrt{\Delta_{дон} (2 - \Delta_{дон})} \Omega \right). \quad (2.1.18)$$

Для реализации Т - образного фильтра используем коаксиальную схему (рис. 2.1.4) [19,64], в которой длина расширительной камеры $l_{кф}$ равна длине индуктивной трубки l_k . Так как $R_\phi = Z_e$, то из принятого условия $\sqrt{L_\phi / C_{кф}} = Z_e$ следует

$$\bar{L}_\phi = \bar{V}_{кф}. \quad (2.1.19)$$

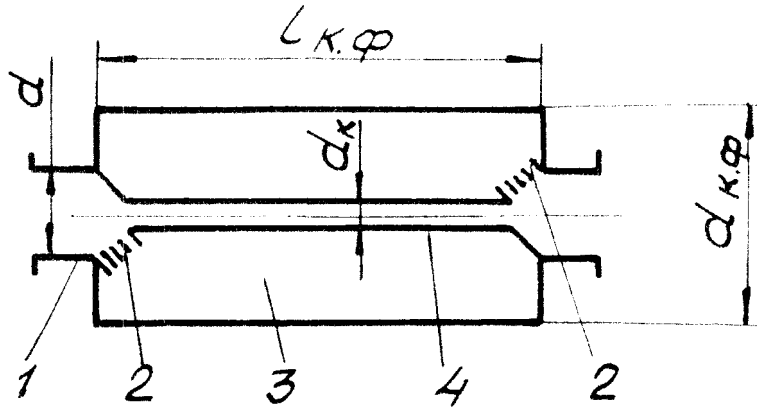


Рис. 2.1.4. Принципиальная схема Т-образного АФНЧ: 1 – штуцер; 2 - дросселирующий элемент из материала МР; 3 - расширительная камера; 4 - центральная трубка ($\varnothing 3 \times 0,25$)

Тогда при принятом значении Ω из совместного решения (2.1.15), (2.1.19) находим $\bar{V}_{кф} = 2\Omega / \pi$. Представив полость камеры фильтра в виде отрезка трубопровода, имеющего внутренний диаметр $d_{кф}$, и длину $l_{кф}$ можно найти относительный ее объем по формуле

$$\bar{V}_{кф} = V_{кф} / (lS) = m_y \bar{l}_{кф}, \quad (2.1.20)$$

где $m_y = (d_{кф} / d)^2$ степень уширения камеры; $\bar{l}_{кф} = l_{кф} / l$ - относительная длина камеры. Используя условие сосредоточенности параметров фильтра, определим наибольший линейный размер камеры:

$$l_{\delta\delta} \leq c / (8f_{\delta\delta}), \quad (2.1.21)$$

где $f_{\delta\delta}$ - верхняя граница полосы пропускания дифференциальной цепи. Согласно (2.1.21)

$$\bar{l}_{кф} = c / (8f_{\delta\delta} l). \quad (2.1.22)$$

Тогда из (2.1.20) и (2.1.22) получим

$$m_y = \bar{V}_{кф} / \bar{l}_{кф} = 8\bar{V}_{кф} f_{\delta\delta} l / c.$$

Так как $\bar{L}_\phi = l_\kappa S / (l S_\kappa) = \bar{l}_\kappa m_c$ (где $m_c = (d/d_\kappa)^2$ - степень сужения инерционного канала), то, принимая $m_c = m_y$, можно рассчитать относительную длину инерционного канала:

$$\bar{l}_\kappa = \bar{L}_\phi / m_y, \quad (2.1.23)$$

а затем - геометрические параметры фильтра:

$$d_{\kappa\phi} = d \sqrt{m_y}; \quad l_\kappa = l \bar{l}_\kappa; \quad d_\kappa = d / \sqrt{m_y}.$$

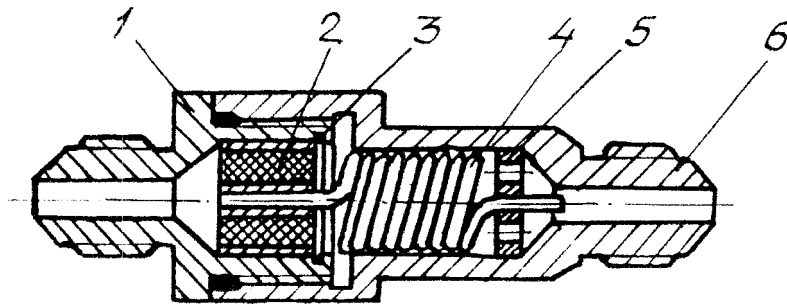


Рис. 2.1.5. Конструктивная схема АФНЧ *RL*-схемы со спиральной индуктивной трубкой: 1 - штуцер; 2 - дроссель из материала МР; 3 - разжимное кольцо; 4 - индуктивная трубка; 5 - упор; 6 - корпус

С использованием соотношений (2.1.11), (2.1.12) могут быть рассчитаны также простейшие АФНЧ в виде *RL*- и *RLC*-схем, как частные случаи Γ -образного мостикового фильтра (рис. 2.1.5).

2.2. Акустический зонд дифференциальной схемы с корректирующими дросселями

2.2.1. Акустический зонд с корректирующим дросселем, размещенным у датчика пульсаций давления

Основные зависимости, описывающие процесс распространения колебаний давления в акустическом зонде, приведены в главе 1. В данном разделе основное внимание уделено рассмотрению особенностей зондов, выполненных по дифференциальной схеме, и описанию процесса подавления колебаний в разгруженной от действия динамической составляющей давления полости датчика перепада давления (рис. 2.2.1).

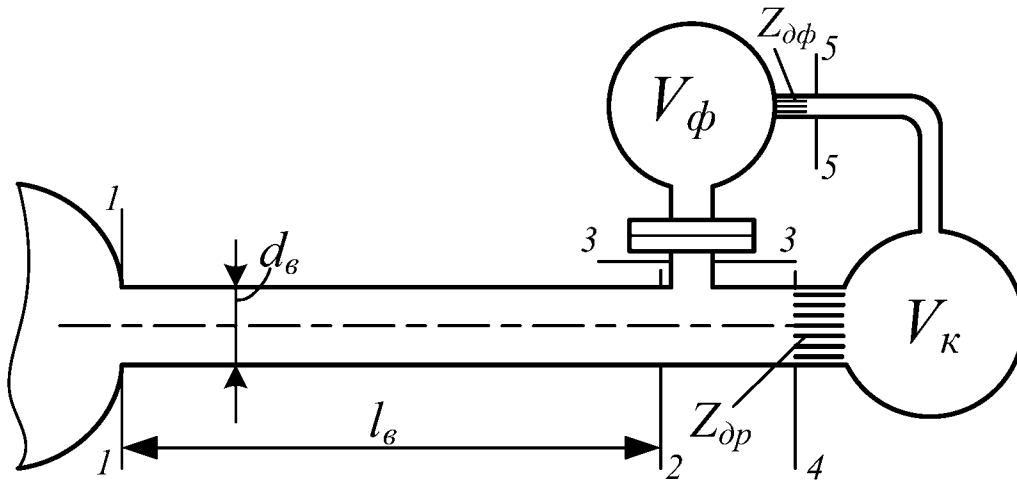


Рис. 2.2.1. Расчетная схема акустического зонда с корректирующим дросселем, установленным на выходе из волноводного канала

Если выбрать акустическое сопротивление корректирующего дросселя равным волновому сопротивлению подводящего канала, а значение концевой емкости в 20...30 раз превышающим емкость подводящего канала, то пульсации давления будут восприниматься датчиком давления без больших динамических искажений. К концевой полости зонда подсоединен акустический фильтр нижних частот, состоящий из дросселя и емкости. Сопротивление фильтра $R_ф$ должно быть больше волнового сопротивления подводящего канала $Z_в$ в 10...20 раз. При этом объем полости фильтра выбирается исходя из значения нижней границы диапазона частот ω_n колебаний давления, измеряемых зондом:

$$V_ф = \frac{\kappa P_{cp}}{\omega_n R_ф} \sqrt{\frac{1}{M_{mp}^2(\omega_n)} - 1}, \quad (2.2.1)$$

где $M_{mp}(\omega_n)$ - требуемая степень подавления колебаний давления в разгрузочной полости датчика по отношению к колебаниям давления в концевой полости.

Указанный метод выбора параметров АФНЧ лишь качественный. Для более точного выбора параметров АФНЧ и корректирующего дросселя необходимо разработать метод расчета частотных характеристик зонда с учетом многих факторов: трения по длине подводящего канала; неоднородности канала по температуре и площади поперечного сечения; конкретных параметров датчика пульсаций давления; режимных параметров объекта контроля (среднего давления, диапазона частот).

При расчете частотных характеристик зонда принимаем те же допущения, что были сделаны в главе 1. Некоторое отличие заключается в

допущении квазистационарности акустического сопротивления фильтра и адиабатного процесса в его емкости.

В данном параграфе процесс распространения колебаний давления в подводящем канале зонда описывается уравнением вида:

$$p_1 = Ap_2 + Bq_2; \quad (2.2.2)$$

$$q_1 = Cp_2 + Dq_2,$$

где p_1, q_1, p_2, q_2 – комплексные амплитуды колебаний давления и объемного расхода на входе в подводящий канал и на его выходе.

Для узла соединения датчика перепада давления и корректирующего дросселя уравнения имеют вид (см. рис. 2.2.1):

$$q_2 = q_3 + q_4; \quad (2.2.3)$$

$$p_2 = p_3 = p_4.$$

Уравнения для входного дросселя датчика перепада давления и емкости его рабочей полости запишем в виде:

$$p_2 - p_\partial = Z_{\partial\partial} q_3; \quad (2.2.4)$$

$$q_3 = Y_{\partial\partial} p_\partial,$$

где p_∂ – комплексная амплитуда колебаний давления в рабочей полости датчика; $Z_{\partial\partial} = \text{Re } Z_{\partial\partial} + j \text{Im } Z_{\partial\partial}$ – импеданс входного дросселя датчика;

$Y_{\partial\partial} = j\omega \frac{V_{\partial\partial}}{\kappa P_{cp}}$ – акустическая проводимость рабочей полости датчика;

$V_{\partial\partial}$ – объем полости датчика давления.

Аналогично можно записать уравнения для корректирующего дросселя и концевой полости:

$$p_2 - p_\kappa = Z_{\partial\kappa} q_4; \quad (2.2.5)$$

$$q_4 = Y_{\kappa\kappa} p_\kappa + q_5,$$

где p_κ – комплексная амплитуда колебаний давления в концевой полости;

q_5 – комплексная амплитуда колебаний расхода через дроссель АФНЧ;

$Z_{\partial\kappa} = \text{Re } Z_{\partial\kappa} + j \text{Im } Z_{\partial\kappa}$ – акустический импеданс корректирующего дросселя;

$Y_{\kappa\kappa} = j\omega \frac{V_\kappa}{\kappa P_{cp}}$ – акустическая проводимость концевой емкости.

Дроссель фильтра и его емкость описываются зависимостями:

$$p_\kappa - p_\phi = Z_{\partial\phi} q_5; \quad (2.2.6)$$

$$q_5 = Y_{\phi\phi} p_\phi,$$

где p_ϕ – комплексная амплитуда колебаний давления в емкости фильтра или в разгрузочной полости датчика давления; $Z_{\partial\phi} = \text{Re } Z_{\partial\phi} + j \text{Im } Z_{\partial\phi}$;

акустический импеданс дросселя фильтра; $Y_{v\phi} = j\omega \frac{V_\phi}{\kappa P_{cp}}$ - акустическая проводимость емкости фильтра.

С использованием приведенных зависимостей частотные характеристики акустического зонда определяются в виде:

$$M(\omega) = \left| \frac{P_\delta - P_\phi}{P_{уст}} \right| \quad (2.2.7)$$

$$\varphi(\omega) = \arg \frac{P_\delta - P_\phi}{P_{уст}} \quad (2.2.8)$$

$$|Y(j\omega)| = \left| \frac{q_1}{P_1} \right| \quad (2.2.9)$$

- модуль акустической входной проводимости зонда;

$$\arg Y(j\omega) = \arg \frac{q_1}{P_1} \quad (2.2.10)$$

- аргумент акустической входной проводимости зонда.

Аналитическое решение уравнений с целью нахождения частотных характеристик может быть выполнено для зонда с однородными элементами. При учете распределенности температуры получаются громоздкие выражения, поэтому для определения частотных характеристик зонда в общем случае целесообразно воспользоваться импедансным методом. По приведенным зависимостям определяется вначале акустическая входная проводимость АФНЧ

$$Y_\phi = \frac{q_5}{P_5} = \frac{Y_{v\phi}}{1 + Y_{v\phi} Z_{\delta\phi}}, \quad (2.2.11)$$

затем входная проводимость фильтра с концевой емкостью и корректирующим дросселем

$$Y_{к\phi} = -\frac{q_4}{P_2} = \frac{Y_{vk} + Y_\phi}{1 + Z_{\delta\phi} (Y_{vk} + Y_\phi)}. \quad (2.2.12)$$

Для датчика пульсаций давления, аналогично случаю с фильтром, определим акустическую входную проводимость:

$$Y_\delta = \frac{q_3}{P_2} = \frac{Y_{v\delta}}{1 + Y_{v\delta} Z_{\delta\delta}} \quad (2.2.13)$$

и далее по уравнениям (2.2.3) акустическую входную проводимость цепи в конце подводящего канала

$$Y_2 = \frac{q_2}{P_1} = Y_{к\phi} + Y_\delta.$$

При известной Y_2 из уравнений (2.2.2) можно определить акустическую входную проводимость акустического зонда

$$Y_1 = \frac{q_1}{p_1} = \frac{C + DY_2}{A + BY_2}, \quad (2.2.14)$$

которая является одной из искомым функций.

В том случае, когда подводный канал является неоднородным, то уравнение (2.2.14) записывают и вычисляют столько раз, на сколько однородных участков разбит подводный канал.

При допущении о том, что объект контроля является идеальным источником колебаний давления, можно принять:

$$\begin{aligned} p_1 &= p_{ист}; \\ q_1 &= Y_1 p_1. \end{aligned} \quad (2.2.15)$$

При известных p_1 и q_1 , проходя в обратном направлении, определяем комплексные амплитуды колебаний давления и расхода во всех выделенных сечениях АЗ, в том числе и в сечении 2-2:

$$\begin{aligned} p_2 &= Ap_1 - Bq_1; \\ q_2 &= -Cp_1 + Dq_1. \end{aligned} \quad (2.2.16)$$

При известном p_2 можно определить комплексные амплитуды колебаний расхода в сечениях 3-3 и 4-4:

$$q_3 = Y_o p_2; \quad q_4 = Y_{кф} p_2, \quad (2.2.17)$$

и далее комплексные амплитуды колебаний давления в рабочей полости датчика и в концевой емкости:

$$\begin{aligned} p_o &= p_2 - Z_{од} q_3; \\ p_к &= p_2 - Z_{оп} q_4. \end{aligned}$$

Из уравнения (2.2.5) находим расход q_5

$$q_5 = q_4 - Y_{вк} p_к \quad (2.2.18)$$

и далее расход в полости фильтра или разгрузочной полости датчика

$$p_o = \left[(1 + Z_{оф} Y_{вк}) (1 - Z_{оп} Y_{кф}) - Z_{оф} Y_{кф} \right] p_2. \quad (2.2.19)$$

При известных p_o и $p_ф$ находим перепад давления $p_o - p_ф$ и далее вторую искомую частотную функцию акустического зонда:

$$W(j\omega) = \frac{p_o - p_ф}{p_{ист}}. \quad (2.2.20)$$

Таким образом, из совместного решения уравнений (2.2.1)...(2.2.20) для каждой заданной частоты колебаний определяются модули и аргументы частотных функций, на основе которых строится частотная характеристика акустической измерительной цепи.

2.2.2. Акустический зонд с корректирующим дросселем, размещенным на входе в подводящий канал

Выравнивание амплитудно-частотных характеристик акустического зонда (рис. 2.2.2) достигается при акустическом сопротивлении корректирующего дросселя, равном волновому сопротивлению канала. Параметры АФНЧ качественно задаются из условий, приведенных в параграфе 2.1.

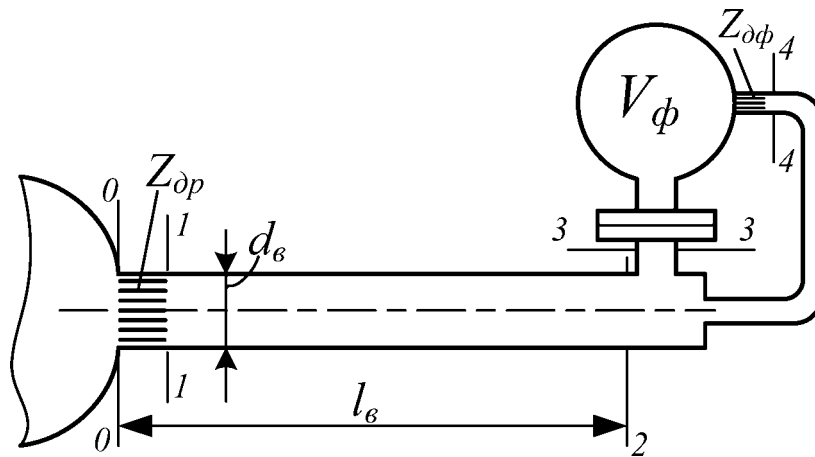


Рис. 2.2.2. Схема акустического зонда с корректирующим дросселем на входе в волновод

Для определения частотных характеристик акустического зонда запишем уравнения, описывающие распространение акустических волн в элементах газовой измерительной цепи:

для участка дросселя

$$p_0 - p_1 = Z_{дp} q_1, \quad p_0 = p_{ист}, \quad (2.2.21)$$

для участка волноводного канала

$$p_1 = A p_1 + B q_2; \quad (2.2.22)$$

$$q_1 = c p_2 + D q_2,$$

для сечения 2-2

$$q_2 = q_3 + q_4; \quad p_2 - p_d = Z_{дф} q_3, \quad (2.2.23)$$

для сечения 3-3

$$q_3 = Y_{vд} p_d, \quad (2.2.24)$$

для дросселя фильтра с емкостью АФНЧ

$$p_4 - p_\phi = Z_{дф} q_4; \quad (2.2.25)$$

$$q_4 = Y_{vф} p_\phi,$$

где p_i, q_i – комплексные амплитуды колебаний давления и объемного расхода в соответствующих сечениях (см. рис. 2.2.2), Z_i, Y_i – импедансы дросселей и акустические проводимости емкостей.

Определим последовательно, проходя от сечения к сечению, входные акустические проводимости участков цепи:

проводимость фильтра (в сечении 4-4)

$$Y_\phi = \frac{q_4}{p_4} = \frac{Y_{v\phi}}{1 + Y_{v\phi} Z_{\phi\phi}}; \quad (2.2.26)$$

проводимость датчика давления

$$Y_\delta = \frac{q_3}{p_3} = \frac{Y_{v\phi}}{1 + Y_{v\delta} Z_{\delta\delta}}; \quad (2.2.27)$$

проводимость цепи в сечении 2-2

$$Y_2 = Y_\delta + Y_\phi; \quad (2.2.28)$$

проводимость цепи в сечении 1-1

$$Y_1 = \frac{q_1}{p_1} = \frac{C + DY_2}{A + BY_2}; \quad (2.2.29)$$

проводимость цепи в сечении 2-2

$$Y_2 = \frac{q_2}{p_2} = \frac{Y_3}{1 + Y_3 Z_{\phi\phi}}; \quad (2.2.30)$$

проводимость цепи в сечении 1-1

$$Y_1 = \frac{q_1}{p_1} = \frac{C + DY_2}{A + BY_2}; \quad (2.2.31)$$

проводимость всей цепи в сечении 0-0

$$Y_0 = Y_\delta / (1 + Z_{\phi\phi} Y_\phi), \quad (2.2.32)$$

которая является одной из искомым частотных характеристик акустического зонда.

При известных Y_0 и $p_{уст}$, проходя в обратном направлении, определим комплексные амплитуды колебаний давления и расхода во всех выделенных сечениях зонда. Для этого воспользуемся исходными уравнениями и запишем:

в сечении 1-1

$$p_0 = p_{уст}; \quad (2.2.33)$$

$$q_1 = Y_0 p_1,$$

в сечении 2-2

$$p_2 = Ap_1 - Bq_1; \quad (2.2.34)$$

$$q_2 = -Cp_1 + Dq_1,$$

в сечении установки датчика давления

$$p_{\partial} = (1 - Z_{\partial\partial} Y_{\partial}) p_2, \quad (2.2.35)$$

в сечении на входе в АФНЧ фильтр

$$p_{\phi} = (1 - Z_{\partial\phi} Y_{\phi}) p_4; \quad \Delta p = p_{\partial} - p_{\phi} \quad (2.2.36)$$

и далее частотную функцию акустического зонда в виде (2.2.20).

На рис. 2.2.5 в качестве примера приведены АЧХ измерительной цепи без КЭ и с КЭ в виде сосредоточенного дросселя, размещенного на входе в подводящий канал.

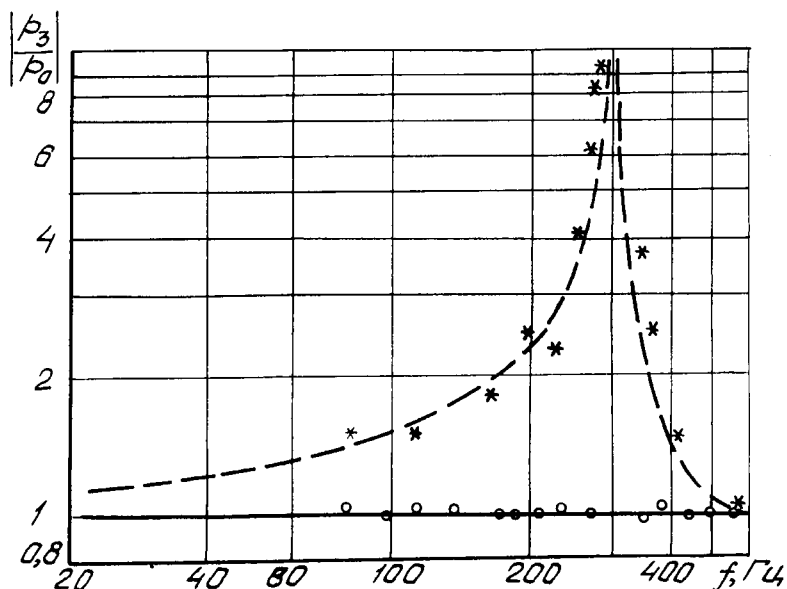


Рис. 2.2.5. АЧХ гидравлической информационной цепи ($l = 1$ м; $d = 3,95$ мм; рабочая среда - АМГ-10; $P_{\text{ср}} - 4$ МПа; $A_{p_0} = 0,2$ МПа):----- расчет; * - эксперимент без дросселя коррекции; ———— - расчет; o - эксперимент с дросселем коррекции из МР на входе ($Re \bar{Z}_{\partial} = 1$)

Таким образом, частотные характеристики зонда определяются из совместного решения уравнений (2.2.21)...(2.2.36) импедансным методом.

Аналогично рассмотренным в разделах 2.2.1 и 2.2.2 схемам коррекции частотных характеристик измерительной цепи могут быть выведены расчетные соотношения для дифференциальных цепей с другими КЭ в виде сосредоточенных дросселей [67].

2.3. Акустический зонд с корректирующим элементом в виде капиллярных каналов

Корректирующий элемент в виде пучка капиллярных каналов является одним из эффективных средств повышения динамической точности акустических зондов. Однако до сих пор не существует метода расчета частотных характеристик зондов с таким КЭ. Теоретическое исследование частотных характеристик акустического зонда проводится на базе математической модели измерительной цепи, разработанной при следующих

допущениях: объект испытаний по отношению к измерительному устройству представляет собой источник колебаний давления; потеря энергии колебаний газа в подводящем канале и капиллярах учитываются в соответствии с высокочастотной теорией; площадь проходного сечения и температура газа по длине волновода могут изменяться; податливость чувствительного элемента датчика давления учитывается приведенным объемом; капилляры в пучке акустически однородны и имеют одинаковые диаметры (рис. 2.3.1) [29,67].

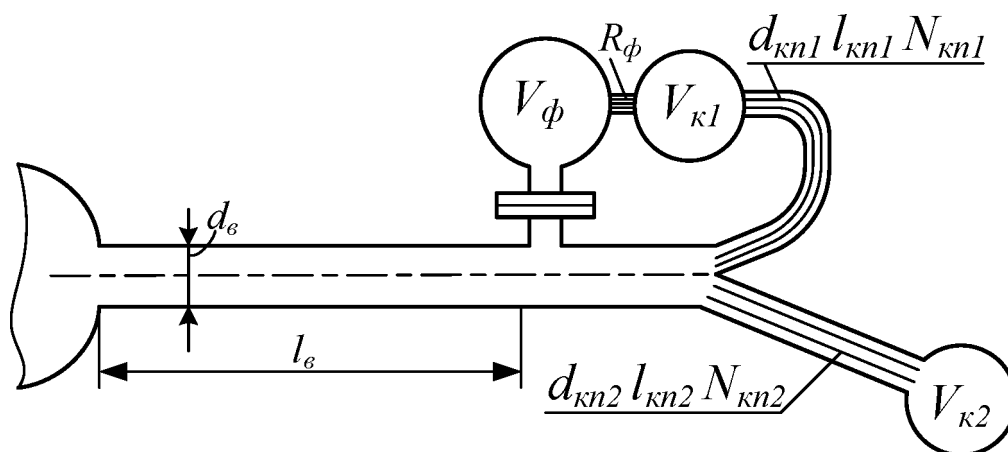


Рис. 2.3.1. Расчетная схема акустического зонда для измерения пульсаций давления

Представив участки измерительной цепи в виде последовательного соединения однородных элементов, можно выразить при принятых допущениях связь между комплексными амплитудами давления и объемного расхода по концам элементов формулами:

$$p_{i1} = A_{ei} p_{i2} + B_{ei} q_{i2}; \quad (2.3.1)$$

$$q_{i1} = C_{ei} p_{i2} + D_{ei} q_{i2},$$

где p_{i1} , q_{i1} - комплексные амплитуды колебаний давления и объемного расхода на входе; p_{i2} , q_{i2} - комплексные амплитуды колебаний давления и объемного расхода на выходе; Z_i - A_{ei} , B_{ei} , C_{ei} , D_{ei} - коэффициенты матрицы передачи i -го участка измерительной цепи; i - индекс, принимающий значения $i=1,2,\dots,I$, I - число участков канала.

Уравнения граничных условий для конечного сечения подводящего канала выводятся, исходя из равенства давлений и неразрывности потока газа:

$$p_{I2} = p_0 = p_{к11} = p_{к21}; \quad (2.3.2)$$

$$q_{I2} = q_0 + n_1 q_{к11} + n_2 q_{к21}, \quad (2.3.3)$$

где p_0 , q_0 - комплексные амплитуды колебаний давления и объемного расхода на входе в полость чувствительного элемента датчика давления; n_1 ,

n_2 - число капилляров в первом и втором пучке. Комплексные амплитуды p_∂ , q_∂ связаны зависимостью

$$p_\partial = q_\partial / Y_\partial, \quad (2.3.4)$$

где $Y_\partial = jV_\partial\omega / (\kappa P_{cp})$ - входная акустическая проводимость датчика; V_∂ - приведенный объем полости чувствительного элемента датчика.

Уравнения, связывающие комплексные амплитуды колебаний давления и расхода по концам капиллярных каналов имеют вид:

для первого пучка капилляров

$$p_{\kappa 11} = A_{\kappa 1} p_{\kappa 12} + B_{\kappa 1} q_{\kappa 12}; \quad (2.3.5)$$

$$q_{\kappa 11} = C_{\kappa 1} p_{\kappa 12} + D_{\kappa 1} q_{\kappa 12},$$

для второго пучка капилляров

$$p_{\kappa 21} = A_{\kappa 2} p_{\kappa 22} + B_{\kappa 2} q_{\kappa 22}; \quad (2.3.6)$$

$$q_{\kappa 21} = C_{\kappa 2} p_{\kappa 22} + D_{\kappa 2} q_{\kappa 22}.$$

Уравнения граничных условий для концевых сечений капилляров записываются в форме:

$$q_{\kappa 12} = (Y_{\kappa 12} / n_1) p_{\kappa 12}; \quad q_{\kappa 22} = (Y_{\kappa 22} / n_2) p_{\kappa 22}, \quad (2.3.7)$$

где $Y_{\kappa 12} = jV_{\kappa 1}\omega / (\kappa P_{cp})$, $Y_{\kappa 22} = jV_{\kappa 2}\omega / (\kappa P_{cp})$ - акустические проводимости концевых емкостей первого и второго пучка капилляров.

Дроссель фильтра и его емкость описываются зависимостями:

$$p_{\kappa 21} - p_\phi = Z_{\partial\phi} q_\phi; \quad (2.3.8)$$

$$q_\phi = Y_{v\phi} p_\phi,$$

где p_ϕ - комплексная амплитуда колебаний давления в емкости фильтра или в разгрузочной полости датчика давления; $Z_{\partial\phi} = \text{Re} Z_{\partial\phi} + j \text{Im} Z_{\partial\phi}$ - акустический импеданс дросселя фильтра; $Y_{v\phi} = j \frac{V_\phi}{\kappa P_{cp}}$ - акустическая

проводимость емкости фильтра.

С использованием приведенных зависимостей определяются частотные характеристики акустического зонда в виде:

$$M(\omega) = \left| \frac{p_\partial - p_\phi}{p_{уст}} \right|; \quad (2.3.9)$$

$$\varphi(\omega) = \arg \frac{p_\partial - p_\phi}{p_{уст}}; \quad (2.3.10)$$

$$|Y(\omega)| = \left| \frac{q_1}{p_1} \right|; \quad (2.3.11)$$

$$\arg Y(\omega) = \arg \frac{q_1}{p_1}, \quad (2.3.12)$$

где $p_{ист}$ – комплексная амплитуда колебаний давления в объекте испытаний (источнике колебаний).

Из решения системы уравнений (2.3.1)...(2.3.12) может быть определена частотная функция акустической цепи, связывающая комплексные амплитуды колебаний давления в полости датчика давления p_o и на входе в измерительную цепь p_{11} (в объекте контроля).

Для общности анализа введем следующие безразмерные параметры:

$\bar{p}_i = p_i / (\kappa P_{cp})$, $\bar{q}_i = q_i / (c_e S_I)$ – относительные комплексные амплитуды давления и объемного расхода в i -ом сечении измерительной цепи;

$D_{ni} = v_i l_e / (c_i d_e^2)$ – коэффициент диссипации волн в i -ом участке подводющего канала;

$\bar{T}_i = T_i / T_I$ – относительная температура газа в i -ом участке подводющего канала;

$\bar{V}_o = V_o / (l_e S_I)$ – относительный объем полости чувствительного элемента датчика давления;

$\bar{V}_{\kappa 1} = V_{\kappa 1} / (l_e S_I)$, $\bar{V}_{\kappa 2} = V_{\kappa 2} / (l_e S_I)$, $\bar{V}_\phi = V_\phi / (l_e S_I)$ – относительные объемы концевых емкостей первого, второго пучка капилляров и акустического фильтра;

$\bar{d}_{\kappa n} = d_{\kappa n} / d_I$ – относительный диаметр капилляров;

$\bar{l}_{\kappa 1} = l_{\kappa 1} / l_e$, $\bar{l}_{\kappa 2} = l_{\kappa 2} / l_e$ – относительные длины капилляров первого и второго пучка;

$\bar{\omega} = \omega / \omega_0$ – относительная частота колебаний,

где $\omega_0 = \pi c_e / (2l_e)$ – собственная частота колебаний газа в замкнутом с одного конца подводющем канале; $c_I = \sqrt{\kappa RT_I}$ – скорость звука в газе в I -ом участке подводющего канала; T_i , T_I – температуры газа в i -ых и I -ом участках измерительной цепи; c_e – скорость звука в газе в подводющем канале; d_i , d_I – диаметры подводющего волновода в i -ых и I -ом сечениях; $d_{\kappa n}$ – диаметр капилляров; $S_I = \pi d_I^2 / 4$ – площадь проходного сечения волновода в I -ом сечении.

При принятых безразмерных параметрах коэффициенты матрицы передачи элементов измерительной цепи определяются выражениями, приведенными в разделе 1.5.2.

Так как число участков разбиения измерительной цепи может быть большим, то аналитические выражения для частотных функций зонда получаются громоздкими. Поэтому при расчетах характеристик зонда

предлагается использовать импедансный метод, который был рассмотрен применительно к зонду с физическими параметрами.

По приведенным зависимостям определяется вначале акустическая входная проводимость АФНЧ

$$Y_{\phi} = \frac{q_{\phi}}{p_{\phi}} = \frac{Y_{v\phi}}{1 + Y_{v\phi} Z_{\phi}}, \quad (2.3.13)$$

затем входная проводимость фильтра с концевой емкостью и корректирующим дросселем

$$Y_{\kappa\phi} = \frac{q_{\kappa12}}{p_{\kappa12}} = Y_{v\kappa1} + Y_{v\phi}. \quad (2.3.14)$$

При известной $Y_{\kappa\phi}$ из уравнений (2.3.2) можно определить акустическую входную проводимость первого пучка капиллярных каналов акустического зонда

$$Y_{\kappa1} = \frac{n_1 q_{\kappa11}}{p_{\kappa11}} = n_1 \frac{C_{\kappa1} + D_{\kappa1} Y_{\kappa\phi}}{A_{\kappa1} + B_{\kappa1} Y_{\kappa\phi}}. \quad (2.3.15)$$

Аналогично можно определить акустическую входную проводимость второго пучка капилляров акустического зонда

$$Y_{\kappa2} = \frac{n_2 q_{\kappa21}}{p_{\kappa21}} = n_2 \frac{C_{\kappa2} + D_{\kappa2} Y_{\kappa22}}{A_{\kappa2} + B_{\kappa2} Y_{\kappa22}}. \quad (2.3.16)$$

Для датчика пульсаций давления, аналогично случаю с фильтром, определим акустическую входную проводимость

$$Y_{\phi} = \frac{q_{\phi}}{p_{12}} = \frac{Y_{v\phi}}{1 + Y_{v\phi} Z_{\phi}} \quad (2.3.17)$$

и далее акустическую входную проводимость цепи в конце подводящего канала

$$Y_{I2} = \frac{q_{I2}}{p_{11}} = Y_{\kappa1} + Y_{\kappa2} + Y_{\phi}. \quad (2.3.18)$$

При известной Y_{I2} можно определить акустическую входную проводимость участков волноводного канала, вплоть до сечения 1-1:

$$Y_{i1} = \frac{q_{i1}}{p_{i1}} = \frac{C_i + D_i Y_{I2}}{A_i + B_i Y_{I2}}. \quad (2.3.19)$$

Акустическая входная проводимость зонда в сечении 1-1 Y_{11} является одной из искомым функций.

При допущении о том, что объект контроля является идеальным источником колебаний давления, можно принять:

$$\begin{aligned} p_{11} &= p_{ист}; \\ q_{11} &= Y_{11} p_{11}. \end{aligned} \quad (2.3.20)$$

При известных p_{11} и q_{11} , проходя в обратном направлении, определяем комплексные амплитуды колебаний давления и расхода во всех выделенных сечениях акустического зонда, в том числе и в сечении 2-2:

$$\begin{aligned} p_{i2} &= A_{ei} p_{i1} - B_{ei} q_{i1}; \\ q_{i2} &= -C_{ei} p_{i1} + D_{ei} q_{i1}. \end{aligned} \quad (2.3.21)$$

При известном p_{I2} можно определить комплексные амплитуды колебаний расхода в сечениях 3-3 и 4-4:

$$q_{\partial} = Y_{\partial} p_{I2}; \quad q_{\kappa11} = Y_{\kappa\phi} p_{I2} \quad (2.3.22)$$

и далее комплексные амплитуды колебаний давления в рабочей полости датчика

$$p_{\partial} = p_{I2} - Z_{\partial\partial} q_{\partial}. \quad (2.3.23)$$

Из уравнения (2.3.5) находим комплексные амплитуды колебаний расхода и давления в конце первого пучка капилляров:

$$\begin{aligned} p_{\kappa12} &= A_{\kappa1} p_{\kappa11} - B_{\kappa1} q_{\kappa11}; \\ q_{\kappa12} &= -C_{\kappa1} p_{\kappa11} + D_{\kappa1} q_{\kappa11} \end{aligned} \quad (2.3.24)$$

и далее расход в полость фильтра

$$q_{\phi} = q_{\kappa12} - Y_{\kappa\phi} p_{\kappa12}. \quad (2.3.25)$$

При известном расходе в полость фильтра можно определить в ней давление

$$p_{\phi} = p_{\kappa12} - Z_{\partial\phi} q_{\phi}. \quad (2.3.26)$$

При найденных значениях p_{∂} и p_{ϕ} находим перепад давления $p_{\partial} - p_{\phi}$ и далее вторую искомую частотную функцию зонда

$$W(j\omega) = \frac{p_{\partial} - p_{\phi}}{p_{ист}}. \quad (2.3.27)$$

Таким образом, из совместного решения уравнений (2.3.1)...(2.3.27) для каждой заданной частоты колебаний определяются модули и аргументы частотных функций, на основе которых строится частотная характеристика акустического зонда.

2.4. Методика и программа расчета частотных характеристик измерительных цепей с акустическими корректирующими устройствами

В данном разделе излагается методика и алгоритм программы расчета частотных характеристик измерительных цепей с акустическими корректирующими устройствами в сосредоточенных и распределенных параметрах. Программа РУДИП (расчет устройства для измерения пульсаций давления) [55] позволяет рассчитывать частотные характеристики измерительных цепей с учетом характеристик датчика пульсаций давления

(приведенного объема рабочей полости), среднего давления, распределенности температуры по длине подводящего канала, схем и параметров корректирующего элемента. С использованием разработанной программы можно оценить возможную динамическую погрешность измерительной цепи, подобрать параметры корректирующего элемента, при которых погрешность измерения пульсаций давления не превысит наперед заданную величину в определенном диапазоне частот.

2.4.1. Общие сведения о программе РУДИП для расчета частотных характеристик акустических зондов

При расчете частотных характеристик измерительной цепи использован импедансный метод, заключающийся в том, что вначале при движении от конца цепи к началу рассчитывается входная акустическая проводимость всей цепи. Затем, определив комплексные амплитуды давления и расхода в начальном сечении, рассчитывают при движении в обратном направлении комплексные амплитуды давления и расхода в выделенных сечениях. В соответствии с указанным методом построен алгоритм расчета частотных характеристик акустических зондов с корректирующими элементами.

Программа расчета частотных характеристик акустических зондов РУДИП построена на алгоритмическом языке C++ Builder. Блок-схема программы, раскрывающая порядок ведения порядка расчётов и выводов результатов, приведена на рис. 2.4.1.

Программный набор РУДИП содержит 21 файл: исполняемый файл RUDIP1.EXE и 20 файлов изображений.

Общий объём программы с изображениями – 11,2 МБайт, в том числе 2,4 МБайт – исполняемый модуль.

Программа поставляется в архивированном виде: Rudip1.rar (623 Кбайт); Pict.rar (658 Кбайт).

Для установки программы на компьютере необходимо скопировать архивы в выбранную директорию и распаковать программой WinRAR.exe.

Для работы программы компьютер должен удовлетворять следующим условиям:

- процессор – Pentium;
- наличие операционной системы Windows 98 или выше;
- оперативная память не менее 32 Мбайт;
- разрешение экрана не ниже 1024x768 точек (обязательное условие!) при 256 или более цветах;
- дисковая память: если упомянутые выше 21 файл уже размещены на жёстком диске, то дополнительная память не требуется, если только пользователь не будет сохранять результаты в файлах.



Рис. 2.4.1. Блок-схема программы расчёта частотных характеристик акустической измерительной цепи РУДИП (см. также с. 66)



Рис. 2.4.1. Окончание

2.4.2. Инструкция по пользованию программой РУДИП

Перед тем как пользоваться программой, следует убедиться в наличии в одной директории исполняемого файла RUDIP1.EXE и двадцати файлов изображений, указанных в предыдущем разделе. Запуск программы осуществляется любым из стандартных способов запуска WINDOWS-приложений, например клавишей ENTER.

После запуска на экране появится изображение основного экрана с рядом переключателей (рис. 2.4.2), при помощи которых пользователь задаёт структуру процесса вычислений.

Снизу от переключателей расположено 5 кнопок: "Ввод", "Счёт", "Графики", "Таблица" и "Выход". Нажатие кнопки "Ввод" вызывает появление последующих экранов (рис. 2.4.3-2.4.9), на которых пользователь вводит количественные характеристики подводящего канала, датчика и корректирующего элемента.

По нажатию кнопки "Счёт" происходит вычисление значений частотных функций измерительной системы при заданных параметрах. Если кнопка "Ввод" не нажималась, то расчёты идут при значениях параметров, установленных по умолчанию. Процесс вычислений отражает бегущая строка в левом нижнем углу экрана. Пока расчёт не произведён, кнопки

"Графики" и "Таблица" находятся в пассивном состоянии и не могут быть нажаты.

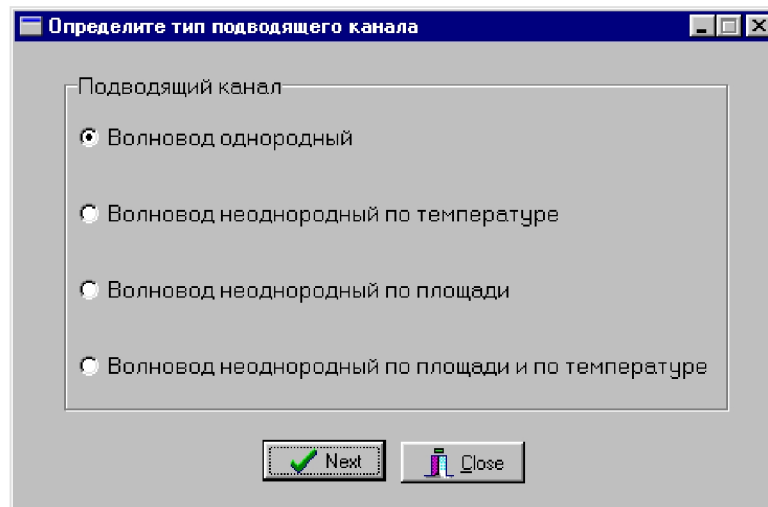


Рис. 2.4.3. Окно задания типа подводящего канала

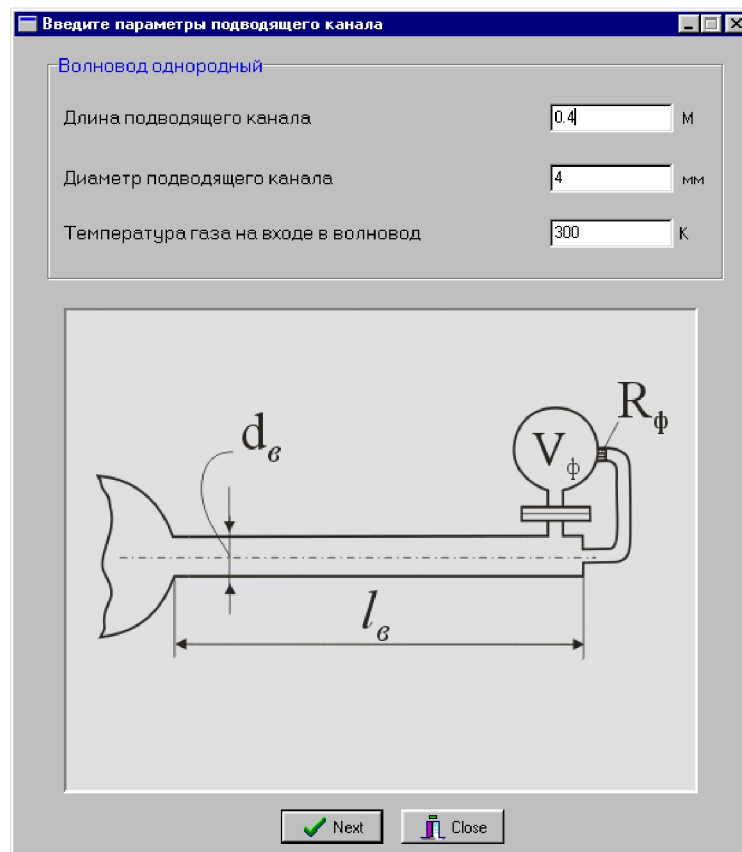


Рис. 2.4.4. Окно ввода параметров однородного подводящего канала

Введите параметры подводящего канала

Волновод неоднородный по температуре и площади

Общая длина подводящего канала	1	М
Длина неоднородного участка канала	0.4	М
Диаметр канала на входе	0.004	М
Диаметр канала на выходе	0.006	М
Температура на входе	500	К
Температура на выходе	300	К
Число разбиений неоднородного участка	50	

Next Close

Рис. 2.4.5. Окно задания параметров подводящего канала при условии его неоднородности

Исходные данные по объекту контроля и датчику

Начальная частота	0.01	Гц
Конечная частота	1000	Гц
Число разбиений диапазона частот	2000	
Среднее давление	10.0	кгс/см ²
Объем полости датчика	10	мм ³
Сопротивление дросселя на входе в датчик	0	Па°С/М ³
Индуктивность дросселя на входе в датчик	0	Па°С ² /М ³
Данные по акустическому RC-фильтру		
Объем фильтра	0.15E+03	см ³
Сопротивление дросселя фильтра	3.3E+10	Па°С/М ³
Индуктивность дросселя фильтра	0	Па°С ² /М ³

Датчик пульсаций перепада давления с корректирующими элементами

Next Close

Рис. 2.4.6. Окно задания параметров датчика пульсаций перепада давления и акустического фильтра

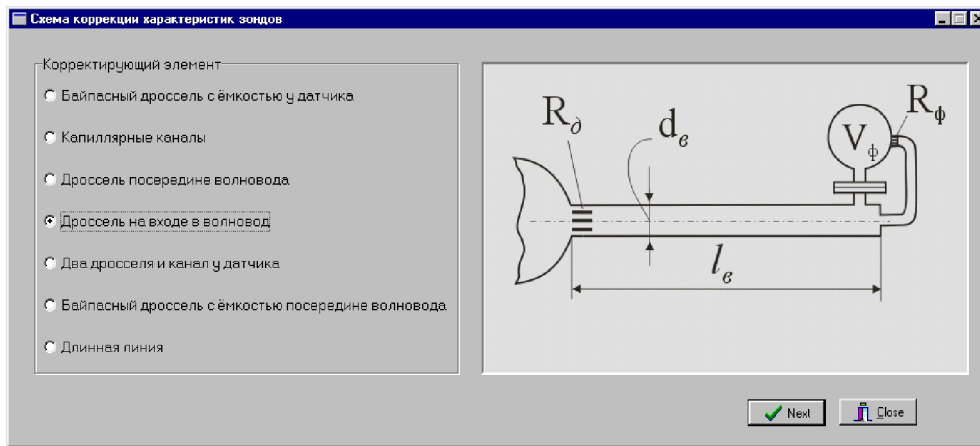


Рис. 2.4.7. Окно выбора схемы коррекции частотных характеристик акустического зонда

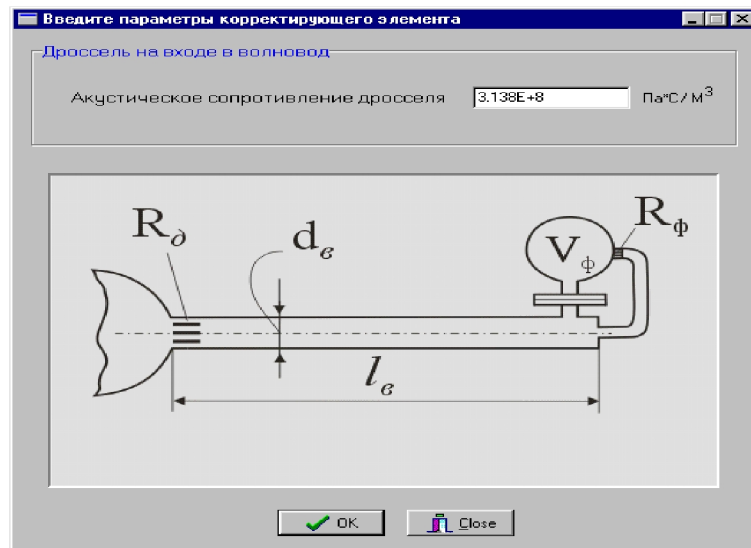


Рис. 2.4.8. Окно выбора параметра корректирующего элемента

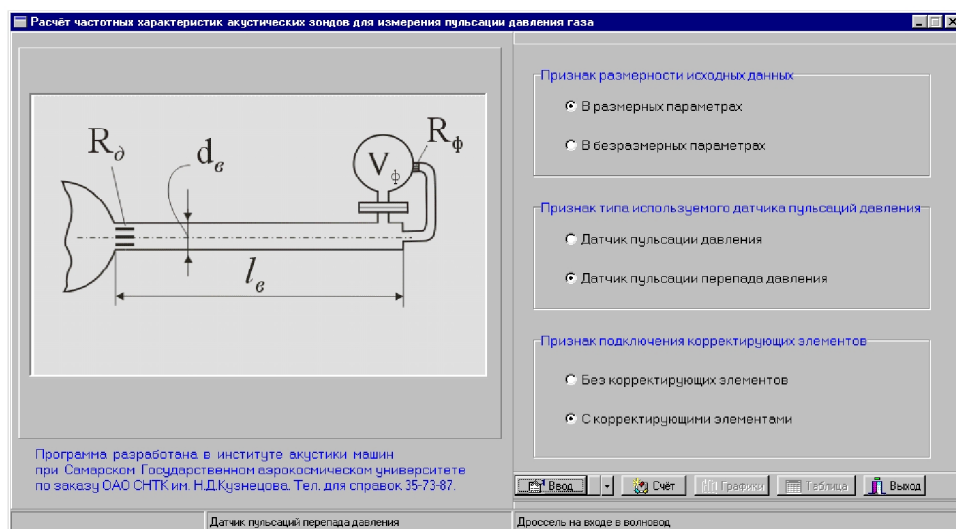


Рис. 2.4.9. Окно запуска процедуры счета

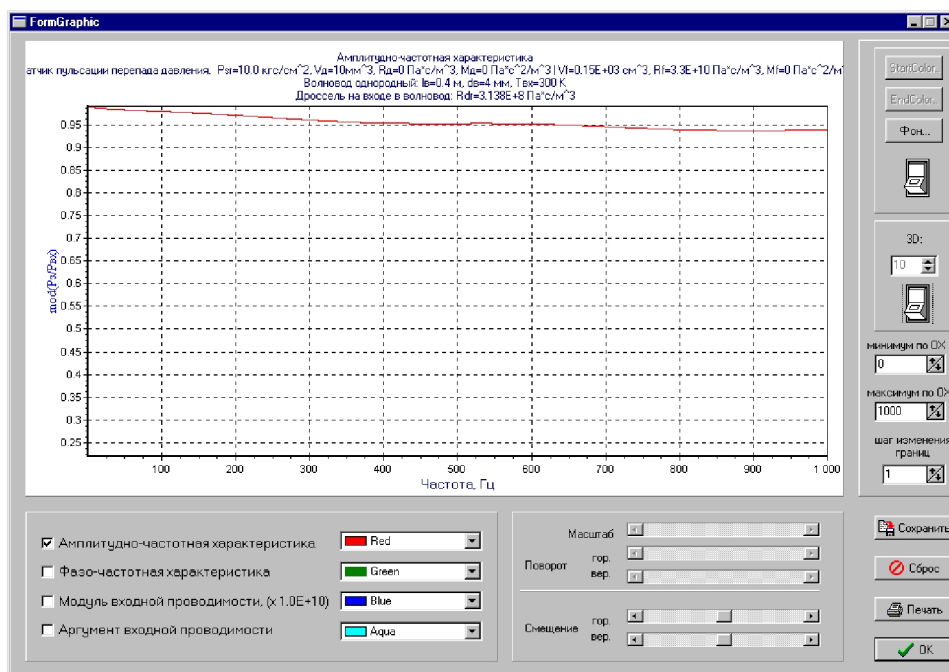


Рис. 2.4.10. Окно вывода графика амплитудно-частотной характеристики акустического зонда

2.4.3. Пример расчета частотных характеристик акустического зонда дифференциальной схемы с корректирующим элементом

В качестве примера применения программы РУДИП рассмотрим расчет АЧХ, ФЧХ и других частотных характеристик акустического зонда, состоящего из подводящего канала длиной 600 мм и с внутренним диаметром 3 мм. В качестве корректирующего устройства выбрана ступенчатая линия, состоящая из двух трубопроводов разного диаметра. При выборе параметров КЭ является важным анализ влияния на частотные характеристики устройства размеров подводящего канала, объема полости на входе в преобразователь давления, среднего давления.

Чем больше диаметр подводящего канала, тем шире диапазон частот измеряемых колебаний в случае идеального согласования характеристик. Однако при этом увеличиваются требуемая длина и диаметр корректирующих элементов, что приводит к существенному увеличению габаритов устройства. Кроме того, диаметр подводящего канала ограничивается максимально допустимым диаметром штуцера подсоединения устройства на изделии.

Длина подводящего трубопровода l_g должна быть минимально допустимой. Чем меньше l_g , тем лучше динамические свойства устройства для измерения давления. Длина подводящего трубопровода определяется местом крепления корпуса устройства, уровнем температур газа в точке измерения. Таким образом, размеры подводящего трубопровода устройства

для измерения динамического давления при анализе его частотных характеристик можно принять неизменными и соответствующими наихудшим условиям.

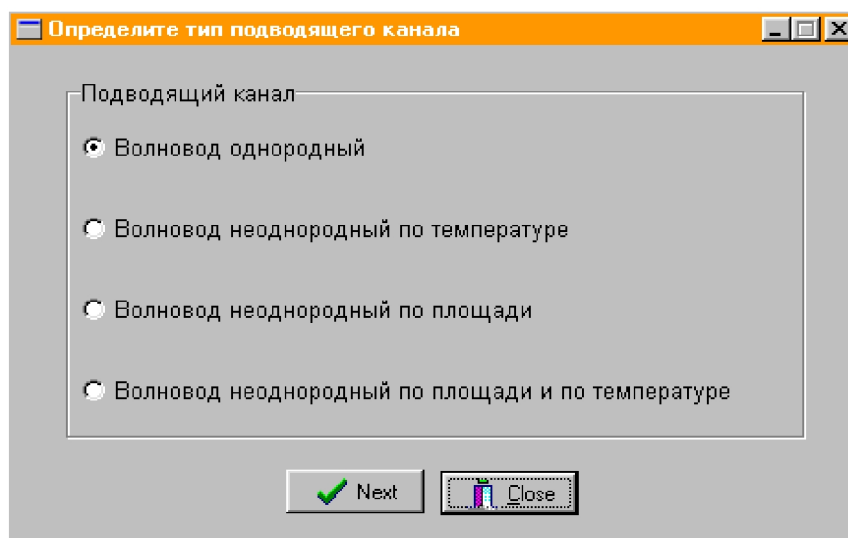


Рис. 2.4.11. Окно задания типа подводящего канала зонда

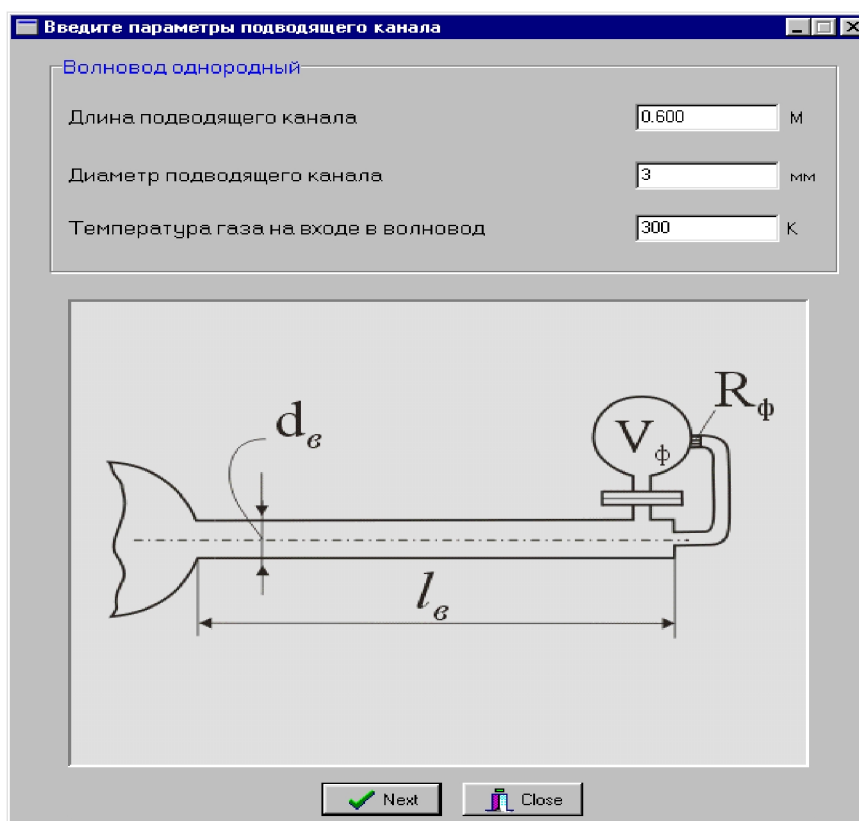


Рис. 2.4.12. Окно задания основных характеристик подводящего канала

Исходные данные по объекту контроля и датчику

Начальная частота	0.1	Гц
Конечная частота	1500	Гц
Число разбиений диапазона частот	1000	
Среднее давление	10.0	кгс/см ²
Объём полости датчика	10	мм ³
Сопротивление дросселя на входе в датчик	0	Па°С/М ³
Индуктивность дросселя на входе в датчик	0	Па°С ² /М ³
Данные по акустическому RC-фильтру		
Объём фильтра	0.15E+03	см ³
Сопротивление дросселя фильтра	3.3E+10	Па°С/М ³
Индуктивность дросселя фильтра	0	Па°С ² /М ³

Датчик пульсаций перепада давления с корректирующими элементами

Next Close

Рис. 2.4.13. Окно задания характеристик датчика, акустического фильтра и диапазона частот расчета акустического зонда

Схема коррекции характеристик зондов

Корректирующий элемент

- Байпасный дроссель с ёмкостью у датчика
- Капиллярные каналы
- Дроссель посередине волновода
- Дроссель на входе в волновод
- Два дросселя и канал у датчика
- Байпасный дроссель с ёмкостью посередине волновода
- Длинная линия

Next Close

Рис. 2.4.14. Окно задания типа корректирующего устройства

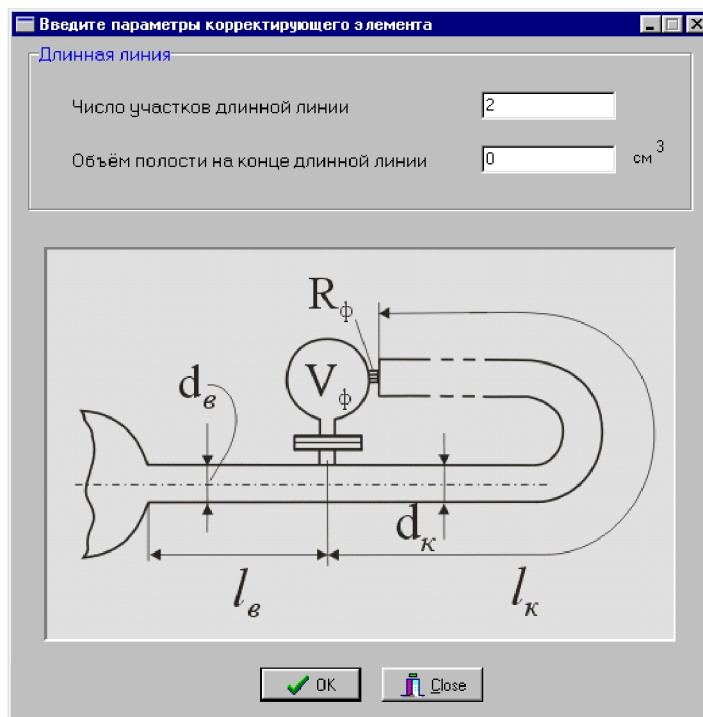


Рис. 2.4.15. Окно задания числа участков длинной корректирующей линии

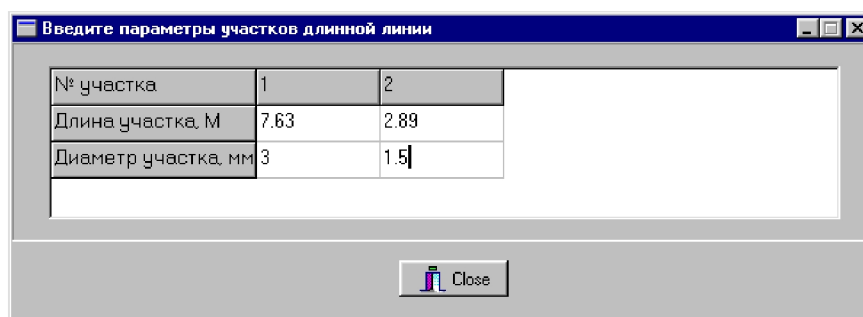


Рис. 2.4.16. Окно задания характеристик ступенчатой корректирующей линии

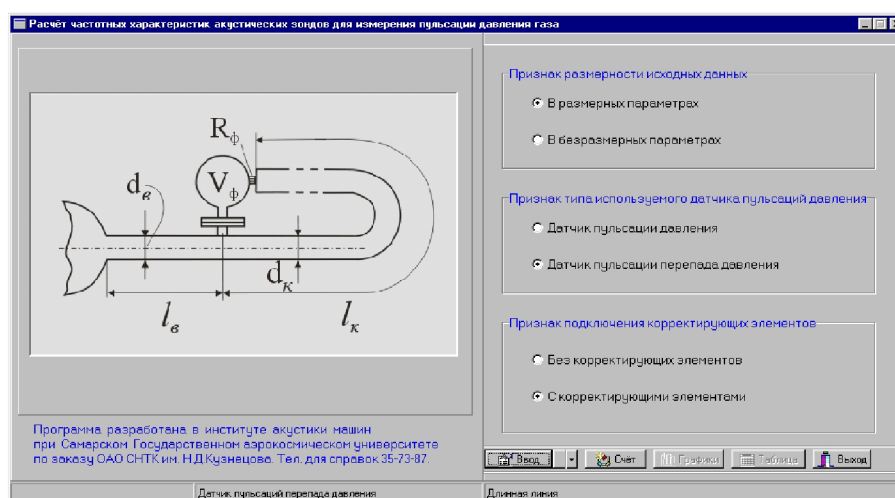


Рис. 2.4.17. Окно для запуска процедуры расчета характеристик акустического зонда по программе РУДИП

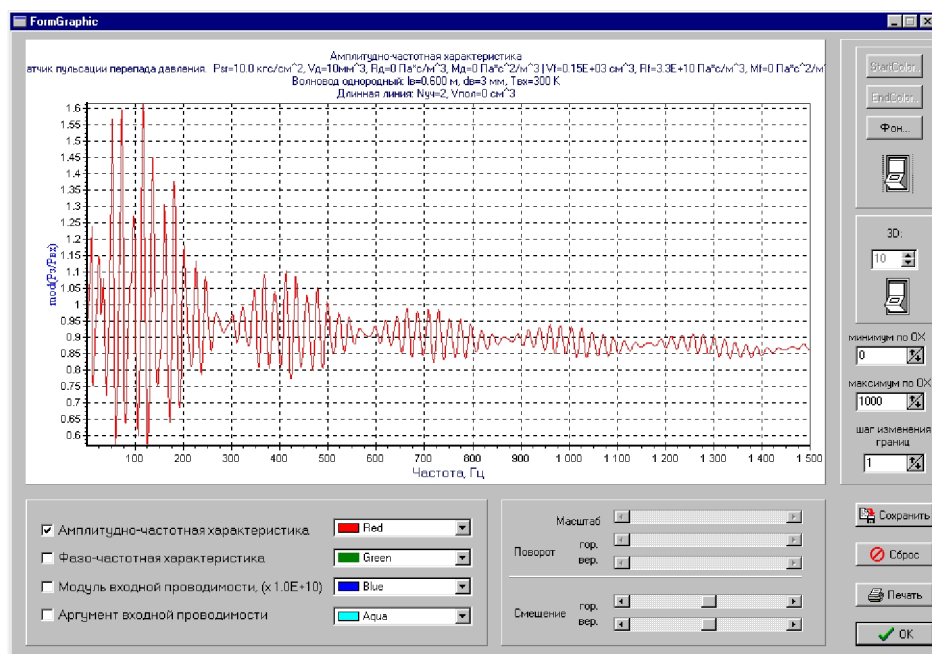


Рис. 2.4.18. Окно вывода графика амплитудно-частотной характеристики акустического зонда

Выше приведены окна программы РУДИП, выведенные в процессе расчета частотных характеристик акустического зонда (рис. 2.4.11-2.4.18).

2.5. Частотные испытания акустических зондов

Экспериментальное исследование трубопроводных информационных цепей и средств коррекции их характеристик проводилось в целях проверки разработанных математических моделей процессов, доводки опытных образцов устройств контроля и измерения пульсирующих давлений. В данном разделе описываются созданные при участии авторов экспериментальные установки и измерительно-регистрационный комплекс, излагается методика частотных испытаний и приводятся результаты экспериментальных исследований информационных ПГЦ.

2.5.1. Испытания акустических зондов при температуре окружающей среды

Частотные испытания пневматических измерительных цепей проводились на установке пульсирующих давлений в СГАУ в диапазоне частот до 1200 Гц и в заглушенной камере Московского филиала ЦАГИ в диапазоне частот от 20 Гц до 10 кГц. На основании анализа ряда литературных источников была выбрана схема генератора колебаний, позволившая создавать колебания давления как в инфразвуковом, так и в звуковом диапазоне частот (рис. 2.5.1, 2.5.2) [6, 26,54].

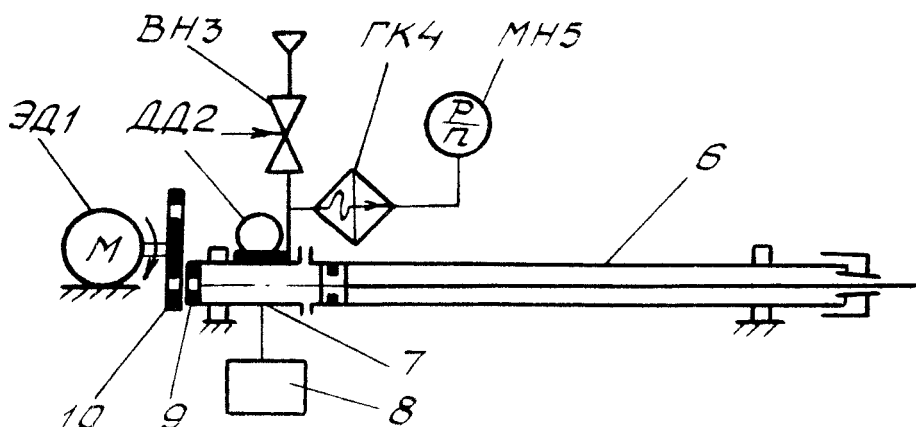


Рис. 2.5.1. Пневматическая схема генератора колебаний давления: ЭД1 - электродвигатель; ДД2 - контрольный датчик давления; ВНЗ - вентиль; ГК4 - гаситель колебаний; МН5 - манометр, (0... 0,6) МПа; 6 - резонансная труба; 7 - рабочая камера; 8 - объект испытаний; 9 - сопло; 10 - модулирующий диск

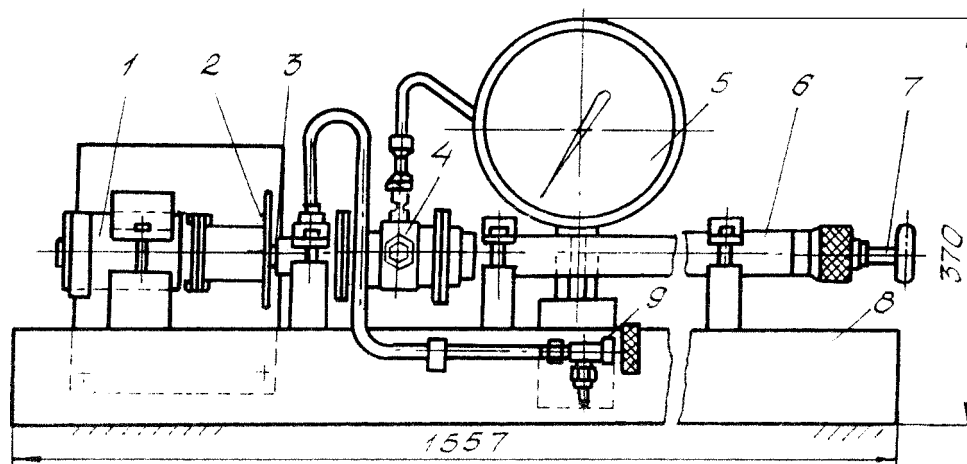


Рис. 2.5.2. Конструктивная схема установки для частотных испытаний измерительных цепей: 1 - электродвигатель МУ-100-АП; 2 - модулирующий диск; 3 - сопло; 4 - датчик давления; 5 - манометр (0...1) МПа; 6 - резонансная трубка; 7 - шток; 8 - рама; 9 - вентиль

Принцип генерирования пульсаций основан на периодическом дросселировании потока воздуха, вытекающего в атмосферу из сопла 9, установленного в рабочей камере 7 генератора. Генератор колебаний давления воздуха состоит из электромеханического привода (высокочастотного и низкочастотного), модулирующего диска, рабочей и резонансной камер. Для регулирования статического давления воздуха в рабочей камере генератора используется вентиль ВНЗ, установленный на линии подвода сжатого газа к генератору. Контроль среднего давления в рабочей камере осуществляется по манометру МН5, подключенному через гаситель колебаний ГК4.

В качестве прерывателя потока при генерировании инфразвуковых колебаний использован сплошной модулирующий диск 10, имеющий торцевое биение относительно среза выходного сопла 9 (см. рис. 2.5.1). Для генерирования пульсаций давления в диапазоне частот 20...1200 Гц использованы три модулирующих диска. Диск Д1 (без отверстий) с торцевым биением 0,3 мм позволяет генерировать колебания с роторной частотой. При использовании диска Д2 с шестью круглыми отверстиями и Д3 с 12 отверстиями реализуются колебания давления соответственно в диапазоне частот 50...250 и 200...1200 Гц. При генерировании колебаний давления в диапазоне частот 20...170 Гц поршень резонатора 7 устанавливается в крайнее левое положение (см. рис. 2.5.2). При этом объем камеры генератора минимален, что дает возможность получать колебания давления с наибольшей амплитудой. С ростом частоты при неизменных условиях генерирования амплитуда колебаний давления монотонно убывает.

При использовании акустического резонатора удается поднять на порядок уровень амплитуды колебаний первой гармоники и существенно снизить высшие гармоники выходного сигнала. Качество выходного сигнала генератора оценивалось по отношению амплитуды второй гармоники колебаний давления к амплитуде первой гармоники. Относительные амплитуды третьей и высших гармоник составляли менее 10 % и при оценке качества выходного сигнала не учитывались.

В целях определения наилучшего сочетания пары сопло-диск изменялась форма проходного сечения сопла (С1...С5) (рис. 2.5.3).

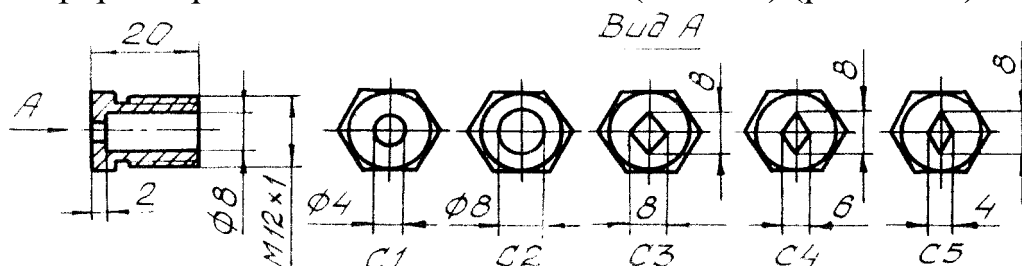


Рис. 2.5.3. Воздушные сопла генератора колебаний давления

Выборочно результаты испытаний генератора представлены на рис. 2.5.4, 2.5.5. Анализ проведенных исследований показал, что амплитуда первой гармоники колебаний давления в камере $A_{p,u}^{(1)}$ изменяется в пределах $(0,01...0,15) \cdot 10^5$ Па. Величина $A_{p,u}^{(1)}$ тем больше, чем выше перепад давления на сопле. В низкочастотной области (до 200 Гц) относительная амплитуда второй гармоники $\bar{A}_{p,u}^{(2)}$ составляет 15...35 %, а в высокочастотной - менее 10 %. Попытка улучшить качество сигнала в низкочастотной области (без резонатора) путем подбора пары сопло-диск не привела к качественному

улучшению формы сигнала. При этом наилучший результат достигнут при применении ромбовидного сопла С4.

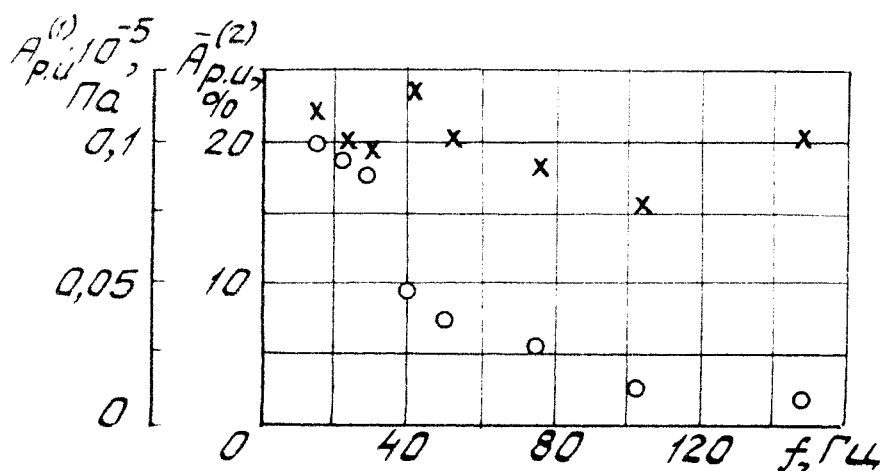


Рис. 2.5.4. Зависимость амплитуды первой гармоники (o) и относительной амплитуды второй гармоники (x) колебаний давления в рабочей камере генератора без резонатора с соплом С4 и диском Д1 от частоты колебаний при $P_{cp} = 0,16$ МПа

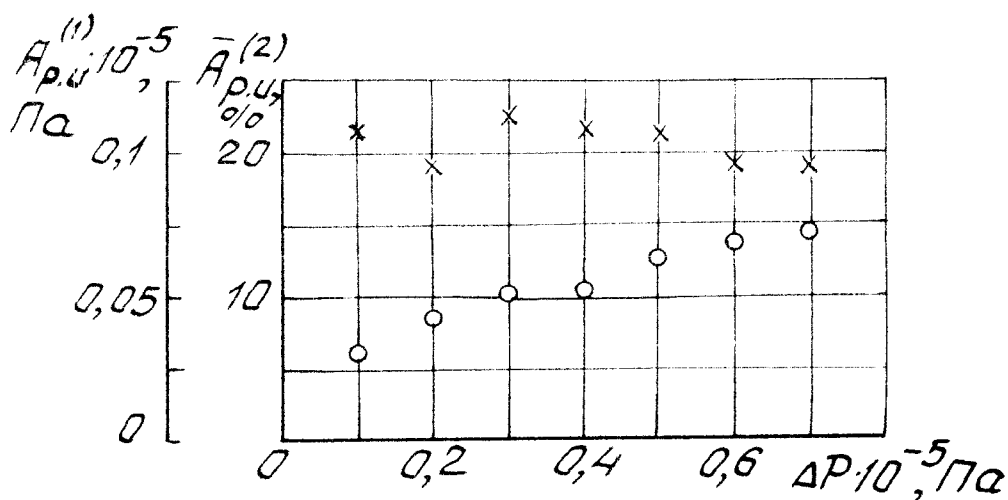


Рис. 2.5.5. Зависимость амплитуды первой гармоники (o) и относительной амплитуды второй гармоники (x) колебаний давления в рабочей камере генератора без резонатора с соплом С4 и диском Д1 от перепада давлений на сопле при частоте 22,5 Гц

Для улучшения формы сигнала в низкочастотной области предложено использовать резонатор в виде отрезка трубы $d_y 30$, длиной 4,6 м с одним открытым концом, при котором реализуется четвертьволновой резонансный режим. При этом амплитуда высших гармоник сигнала зависит от места подвода газа в рабочую камеру генератора. Наименьшие амплитуды высших гармоник реализуются при подводе газа через концевую емкость (ресивер 7) и составляют менее 6 % в диапазоне частот 20...170 Гц. При подводе газа

непосредственно в рабочую камеру (рядом с выходным соплом) высшие гармоники составляют менее 9 % .

Таким образом, разработанная установка обладает следующими основными техническими данными:

среднее давление воздуха на входе в генератор, Па	до $70 \cdot 10^5$;
диапазон среднего давления в камере, Па	до $30 \cdot 10^5$;
расход воздуха через генератор, кг/с	до 0,1;
диапазон частот генерируемых колебаний, Гц	0,2...1500;
диапазон амплитуд пульсаций давления, Па	$(0,02...0,2) \cdot 10^5$;
коэффициент искажения формы выходного сигнала, %	менее 5;
потребляемая мощность, кВт	0,25;
габариты, м	0,3x0,3x5.

Исследования пневматических цепей в области частот до 10 кГц проводились в заглушенной камере в акустическом поле сверхзвуковой струи с преградой (рис. 2.5.6) [69].

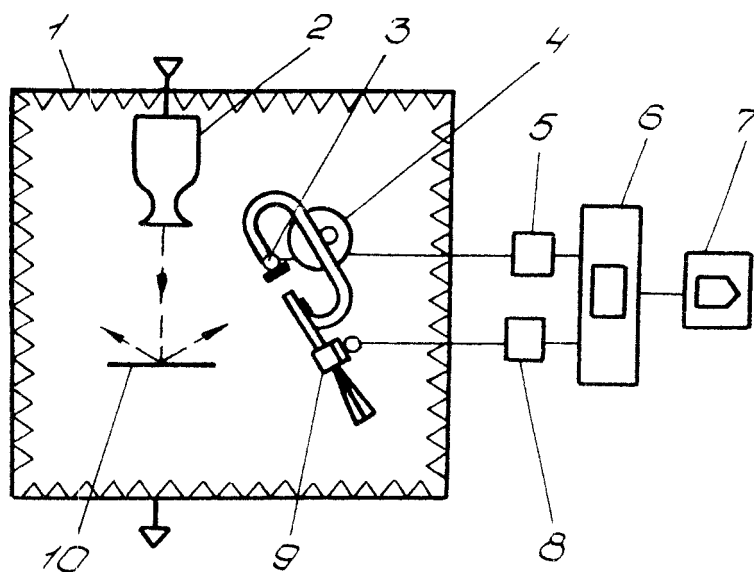


Рис. 2.5.6. Схема проведения испытаний устройств для измерения пульсаций давления газа в заглушённой камере: 1 - камера; 2 - сопловой насадок; 3 - контрольный датчик пульсаций давления (микрофон типа 4135 фирмы "Брюль и Кьер"); 4 - подставка; 5 - усилитель напряжения 2619 (для датчика 4135); 6 - двухканальный анализатор 2031 фирмы "Брюль и Кьер"; 7 - регистратор; 8 - усилитель напряжения 2619 (для датчика ДД6-002Т) или 4422 с блоком питания (для датчика 8506-5); 9 - испытуемое устройство для измерения пульсаций давления на базе датчиков ДЦ6-002Т (НИИ) и 8506-5 (фирмы "Эндевко")

При этом необходимо было обеспечить условия, при которых источник звука близок к точечному источнику, что позволяет учесть влияние на результаты измерения дифракционных поправок. Исследование направленности акустического поля вблизи рабочей точки показало, что во всем исследованном диапазоне частот (1...10 кГц) источник звука

сосредоточен практически в узкой области взаимодействия потока с преградой. Оптимальным расположением контрольного датчика пульсаций давления и исследуемой пневматической цепи является такое, при котором они обращены входами (чувствительными элементами) друг к другу, причем их осевые линии перпендикулярны оси струи. Отклонение входа пневматической цепи относительно контрольного датчика на ± 5 мм не оказывает влияния на точность определения АЧХ цепи, так как размеры рабочей зоны источника колебаний достаточно велики (радиус сферы рабочей зоны не менее 30 мм).

При проведении испытаний в качестве контрольного датчика пульсаций давления использовался микрофон типа 4135 фирмы “Брюль и Кьер”. В акустической цепи применялся пьезоэлектрический датчик пульсаций давления ДД6-002Т, функционирующий в комплекте с измерительной аппаратурой ПАД-6, разработанной ЛИИ. В комплект аппаратуры ПАД-6 входят и стоковые повторители типа ПИ-2, двухканальное согласующее устройство 2СУ-6 и блок источника питания БИП-002. Исследования амплитудных и амплитудно-частотных характеристик ПАД-6 совместно с датчиками показали, что при температурах окружающей среды ± 45 °С предельная погрешность аппаратуры не превышает допустимой величины $\pm 5,2$ %. Для проверки влияния объема полости на входе в датчик пневматической цепи использовался малогабаритный датчик пульсаций давления 8506 фирмы “Эндевко” (США). Обработка сигнала производилась в диапазоне частот от 0,25 до 25,6 кГц по не перекрывающимся реализациям длительностью $31 \cdot 10^{-3}$ с. В каждой реализации определялось значение функции когерентности между каналами. Требуемое число выборок и когерентность сигнала выбиралось в зависимости от допустимой погрешности обработки. Используемый метод обеспечивает обработку сигналов с погрешностью не более $\pm 0,5$ дБ при когерентности 0,9 и числе выборок 100. При обработке экспериментальных данных учитывался поправочный коэффициент микрофонного датчика 4135.

Из графика на рис. 2.5.7 следует, что ДД6-002Т обладает достаточно высокой динамической точностью в диапазоне частот до 25 кГц [69].

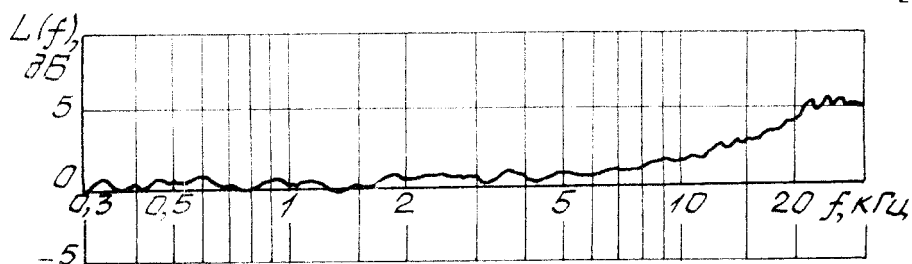


Рис. 2.5.7. Амплитудно-частотная характеристика датчика пульсаций давления ДД6-002Т (по отношению к микрофону 4135)

Частотные испытания гидравлических измерительных цепей проводились в НИИФИ (г. Пенза) на установке пульсирующих давлений, основным узлом которой является пьезоэлектрический генератор (рис. 2.5.8). Установка позволяет определять характеристики цепей в диапазоне частот до 10 кГц при среднем давлении до 60 МПа, рабочая среда - трансформаторное масло, вода [67].

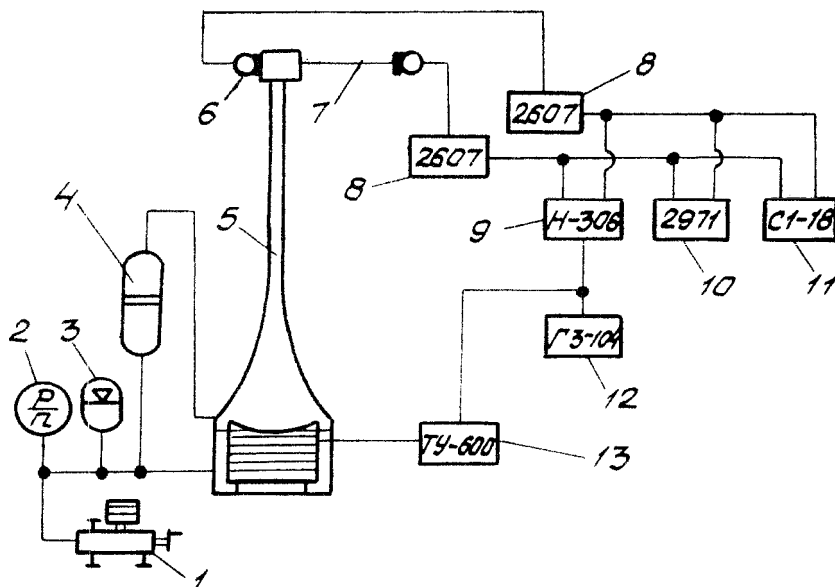


Рис. 2.5.8. Принципиальная схема установки для частотных испытаний устройства для измерения пульсаций давления жидкости: 1 – грузопоршневой манометр МП-600; 2 - манометр, (0...40) МПа; 3, 4 - разделитель сред (на основе пневмогидроаккумулятора); 5 - пьезоэлектрический генератор акустических колебаний давления; 6 – контрольный датчик пульсаций давления; 7 - устройство для измерения пульсаций давления с корректирующим элементом; 8 - усилитель электронный фирмы «Брюль и Кьер»; 9 – двухкоординатный самописец; 10 - фазометр фирмы «Брюль и Кьер»; 11 - двухлучевой осциллограф; 12 - звуковой генератор напряжения; 13 – усилитель мощности

На установке было испытано устройство для измерения пульсаций давления жидкости в насосном тракте двигателя при среднем давлении 50 МПа. Измерительная цепь состояла из подводящего канала ($d=8$ мм, $l=100$ мм), датчика пульсаций давления ЛХ-611АТ ($V \approx 0$), корректирующего дросселя ($R_q=2,12 \cdot 10^{10}$ Па·с/м³), выполненного из пористого материала МР ($d_{нк}=0,09$ мм, $d_q=10$ мм, $l_q=2$ мм) и установленного на входе в канал (рис. 2.5.9). Предварительно были проведены сравнительные испытания контрольного датчика и датчика ЛХ-611АТ.

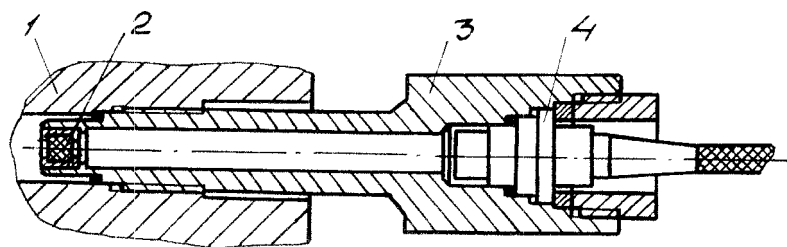


Рис. 2.5.9. Конструктивная схема устройства для измерения пульсаций давления в гидравлическом тракте энергетической установки: 1 - объект контроля; 2 - корректирующий дроссель; 3 - корпус - волноводный канал; 4 - датчик пульсаций давления ЛХ-611АТ

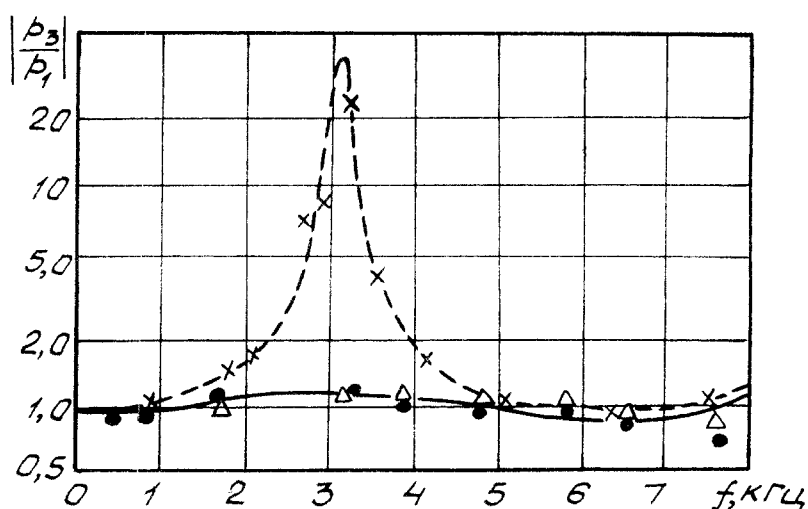


Рис. 2.5.10. АЧХ устройства для измерения пульсаций давления в гидравлическом тракте энергетической установки [12]:

- - расчет; × - эксперимент при $A_{pu} = 0,02$ МПа без КЭ;
- - расчет; Δ - эксперимент при $A_{pu} = 0,02$ МПа;
- - эксперимент при $A_{pu} = 0,1$ МПа с дросселем коррекции из материала МР

Максимальное расхождение показаний датчиков не превышало 6 % в диапазоне частот 0,1...10 кГц. В результате частотных испытаний измерительной цепи с подводным каналом и элементом коррекции в диапазоне частот 0,1...8 кГц и амплитуд колебаний давления $(0,2...1) \cdot 10^5$ Па установлено, что наибольшая погрешность цепи не превышает ± 20 %, в то время как показания устройства без корректирующего дросселя могут отличаться от истинных значений в десятки раз (рис. 2.5.10).

2.5.2. Испытания акустических зондов в высокотемпературных условиях

Частотные испытания пневматических измерительных цепей в высокотемпературных условиях проводились на разработанной авторами установке (рис. 2.5.11) [67], отличающейся от аналогичной установки тем, что к ее резонансной трубе подключена термокамера 19, соединенная через

узкий теплоизолированный канал с трубчатый нагревательным элементом Н20.

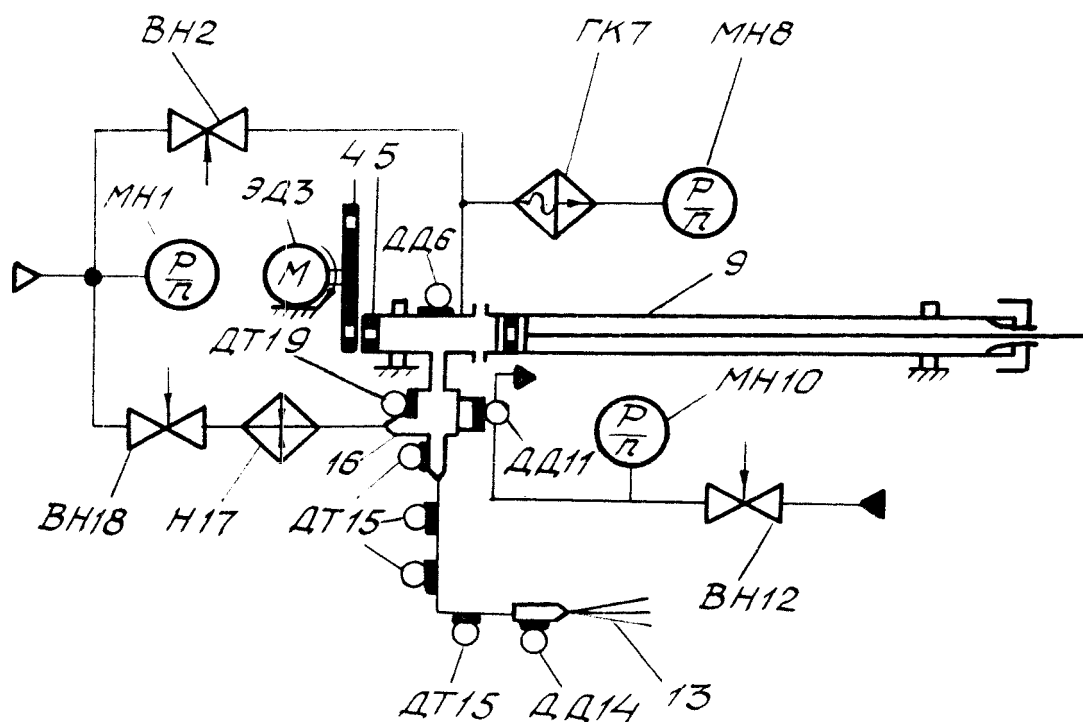


Рис. 2.5.11. Схема установки для частотных испытаний устройства для измерения пульсаций давления в высокотемпературных условиях: МН1 - манометр, (0...1) МПа; ВН2, ВН12, ВН18 - вентиль; ЭДЗ - электродвигатель постоянного тока; 4 - прерывающий диск; 5 - сопло; ДД6 ДД14 - датчики пульсаций давления ДД6-002Т; ГК7 - гаситель колебаний давления; МН8 - манометр (0...0,4) МПа; 9 - резонансная труба; МН10 - манометр, (0...0,4) МПа; ДД11 - датчик пульсаций давления ДД6-002Т в охлаждаемом корпусе; 13 - капиллярный корректирующий элемент; ДТ15 - терморезисторный датчик температуры газа; 16-высокотемпературная камера; Н17-трубчатый нагреватель газа ($d_y=6$, $l=3$ м, Х18Н10Т); ДТ19 - датчик температуры Т95 (термопара Хр-Ал)

В термокамере (рис. 2.5.12) выполнены отверстия для установки охлаждаемого контрольного датчика пульсаций давления 6, датчика температуры 7 и исследуемого устройства для измерения пульсаций давления 8. Пульсации давления, возбуждаемые в резонансной трубе, передаются в термокамеру и воспринимаются контрольным датчиком и испытуемым устройством.

Охлаждение датчика ДД6-002Т осуществляется водой через специальную щелевую рубашку в штуцере-корпусе 4. Кроме того, на входе в датчик установлен пористый теплозащитный экран из материала МР. Перед испытанием измерительного устройства проводилась контрольная проверка охлаждаемого датчика ДД6-002Т с теплозащитным экраном по отношению к показаниям датчика ЛХ-610. Исследованиями при температуре окружающей среды установлено, что влияние экрана сказывается, начиная с частоты 1500 Гц. При 2000 Гц значения амплитуды, определенной охлаждаемым датчиком, снижены на 25 % по сравнению с показаниями датчика ЛХ - 610.

С учетом возможного дополнительного влияния на точность охлаждаемого датчика температуры газа из-за изменения вязкости воздуха и соответственно сопротивления защитного экрана был ограничен верхний предел диапазона частот исследований величиной 1000 Гц. Температура в рабочей камере может изменяться в пределах (293...900) К за счет регулирования электрического напряжения на трубке нагревателя Н17 в диапазоне (2...20) В.

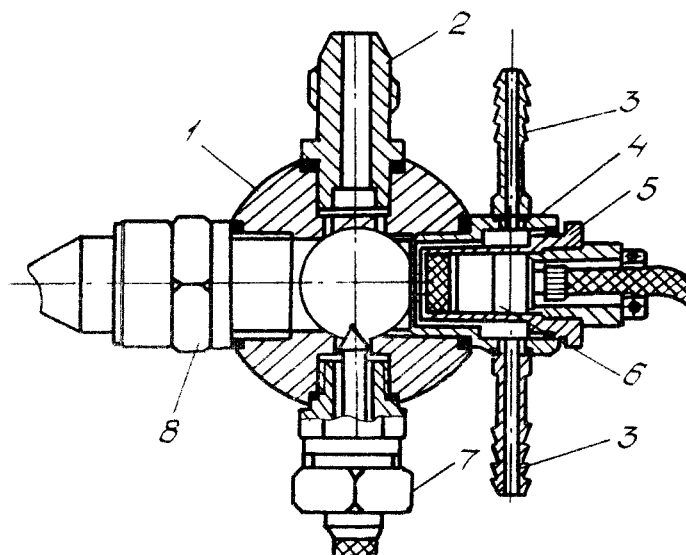


Рис. 2.5.12. Конструктивная схема высокотемпературной камеры акустического генератора для частотных испытаний измерительных цепей (поперечный разрез): 1 - корпус; 2 - штуцер подвода горячего газа; 3 - штуцеры подвода и отвода охлаждающей среды; 4 - корпус охлаждаемого датчика пульсаций давления; 5 - промежуточный штуцер датчика; 6 - датчик пульсаций давления ДД6-002Т; 7 - датчик, температуры Т95; 8 - датчик, пульсаций давления ЛХ-610

Температура в рабочей камере измерялась датчиком Т95, а по длине измерительной цепи - терморезистивным преобразователем (рис. 2.5.13).

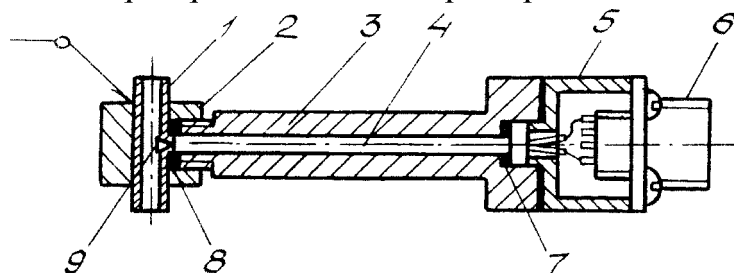


Рис. 2.5.13. Терморезисторный датчик температуры газа: 1 - волноводный канал; 2 - втулка; 3 - корпус; 4 - керамический выводной канал; 5 - переходник; 6 - электрический разъем РС10; 7, 8 - уплотнительное кольцо; 9 - термочувствительная проволока (Х18Н10Т) с диаметром 0,013 мм и базой 2,5 мм

Испытание волноводной цепи струйно-акустического датчика температуры газа с усилителем и КЭ проводилось на термовакuumной

установке (рис. 2.5.14) при абсолютном давлении до $0,1 \cdot 10^5$ Па и температуре газа до 900 К.

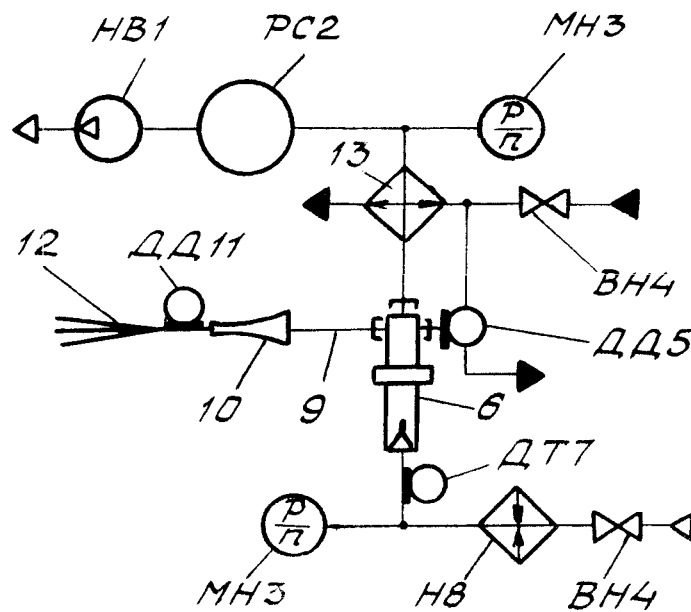


Рис. 2.5.14. Пневмогидравлическая схема стенда для частотных испытаний струйно-акустического датчика температуры газа в разреженной среде: НВ1 - насос вакуумный АВЗ-90; РС2 - ресивер объемом $70 \cdot 10^3$ м³; МНЗ – мановакуумметр (-0,1,...0,1) МПа; ВН4 - вентиль; ДД5 – охлаждаемый пьезоэлектрический датчик пульсаций давления ДД6-002Т; 6 - струйно-акустический датчик температуры газа; ДТ7 - датчик температуры Т95; НВ - нагреватель воздуха трубчатый ($d_y=6$ длиной 3 м) из материала Х18Н10Т; 9 - волноводный канал; 10 - акустический усилитель; ДД11 - датчик пульсаций давления ДД6-002Т; 12 - капиллярный корректирующий элемент; 13 - воздушно-водяной теплообменник

При изменении температуры воздуха на входе в струйно-акустический датчик от 300 К до 880 К частота колебаний изменялась в диапазоне (8,5...14,5) кГц (рис. 2.5.15) [31].

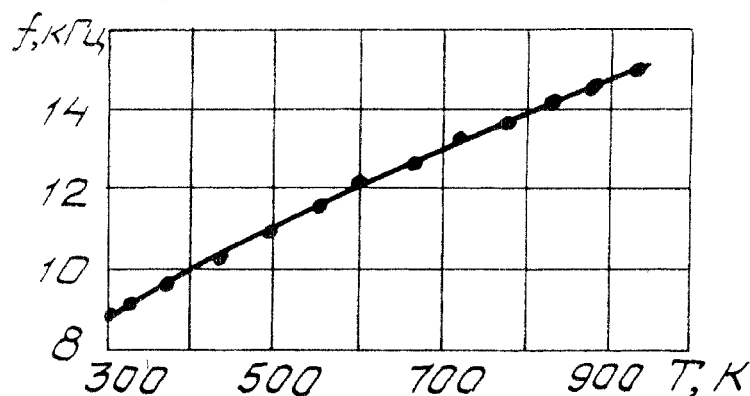


Рис. 2.5.15. Зависимость частоты колебаний давления на выходе из струйно-акустического датчика от температуры газа на его входе: • - эксперимент; — - аппроксимация

Результаты испытаний струйно-акустического датчика температуры газа приведены в параграфе 3.5.

3. АКУСТИЧЕСКИЕ ЗОНДЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В БОРТОВЫХ И СТЕНДОВЫХ СИСТЕМАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

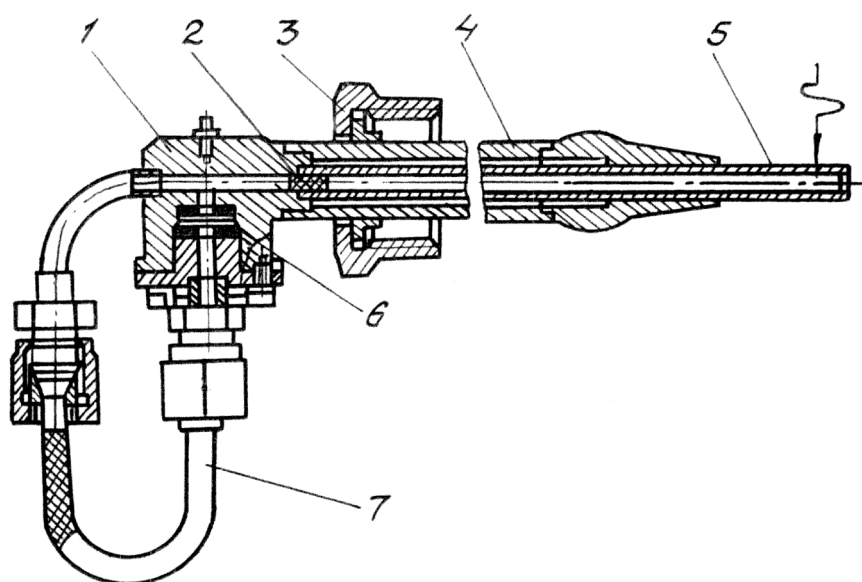
Описываются акустические средства измерения пульсаций давления с подводными каналами, разработанные авторами и которые нашли применение при испытании авиационных ГТД и стендовой доводке высокотемпературных его узлов. Излагается порядок выбора измерительных цепей в зависимости от предъявляемых к ним технических требований и условий их эксплуатации.

3.1. Измерение пульсаций давления в проточной части ГТД

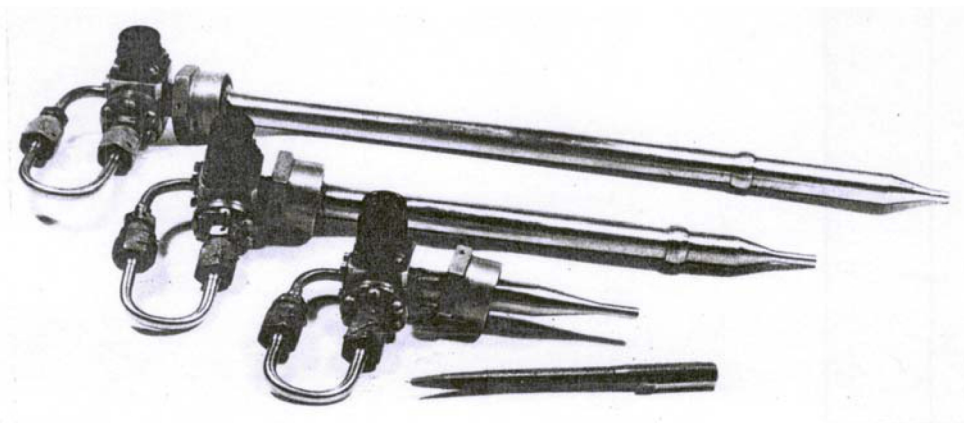
В ОАО СНТК имени Н.Д. Кузнецова с учетом рекомендаций, полученных в результате проведенных исследований, разработаны устройства для измерения пульсаций давления: П.1261 - за вентилятором; П.1259 - за компрессором низкого давления; П.1260 - за компрессором высокого давления двигателя НК-86 (рис. 3.1.1). Схема установки устройств в проточной части двигателя приведена на рис. 3.1.2. Основным требованием, предъявляемым к измерительным устройствам в соответствии с техническим заданием, было обеспечение равномерной (в пределах $\pm 10\%$) передачи колебаний давления с амплитудой до $0,4 \cdot 10^5$ Па в частотном диапазоне (10...150) Гц.

Измерительные устройства выполнены по одной схеме, включающей дифференциальный датчик, акустический RC - фильтр с большим входным сопротивлением и дроссель коррекции, размещенный в середине волноводного канала. Разработанные устройства отличаются друг от друга пределом измерения датчиков пульсаций давления и длиной подводных каналов.

Акустический зонд (см. рис. 3.1.1,а) состоит из корпуса 1, внутри которого размещен дифференциальный датчик пульсаций давления 6 типа ДМИ. Динамическая камера датчика 6 связана с входом в прибор при помощи волноводного канала 5, изготовленного из трубопровода. К корпусу 1 приварена трубка $d_3=4$, являющаяся продолжением волноводного канала 5, к которой посредством штуцера подсоединен акустический фильтр нижней частоты 7 с высоким входным сопротивлением.



а



б

Рис. 3.1.1. Конструктивная схема (а) и внешний вид (б) устройства ГП261 для измерения пульсаций давления за вентилятором двигателя НК-86: 1 - корпус; 2 - дроссель коррекции из пористого материала МР; 3 - гайка крепежная; 4 - наружная оболочка; 5 - подводящий волноводный канал; 6 - датчик пульсаций давления типа ДМИ; 7 - акустический РС - фильтр

АФНЧ 7 предназначен для разгрузки датчика от действия статического давления, а также для создания соответствующих граничных условий на выходе из волноводного канала 5, на боковой поверхности которого в непосредственной близости от заглушенного торца выполнено входное овальное отверстие размером 3×5 мм. Для обеспечения необходимой точности и жесткости устройства волновод 5 установлен внутри патрубка (наружной оболочки), приваренного к корпусу Т. Для коррекции АЧХ устройства использовались сосредоточенные дроссели 2 из материала МР, которые устанавливались в специальную проточку в волноводе.

Электрические выводы датчика осуществлены через штепсельный разъем 2РМ14Б4Ш1В1, укрепленный на корпусе 1.

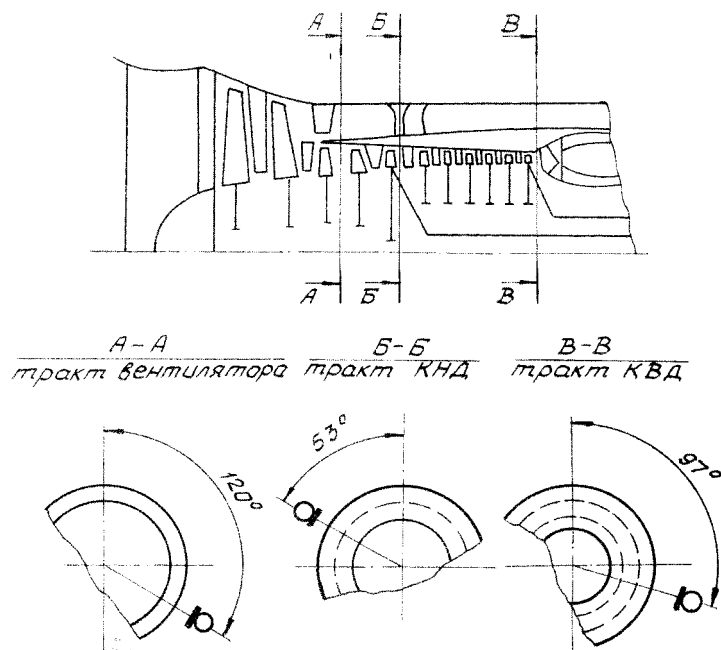


Рис. 3.1.2. Схема установки устройства для измерения пульсаций давления в проточной части двигателя НК-86

Описанные устройства применялись в процессе стендовых и летных испытаний двигателя НК-86 на летающей лаборатории. В качестве примера на рис. 3.1.3 приведена экспериментальная АЧХ устройства П1261.

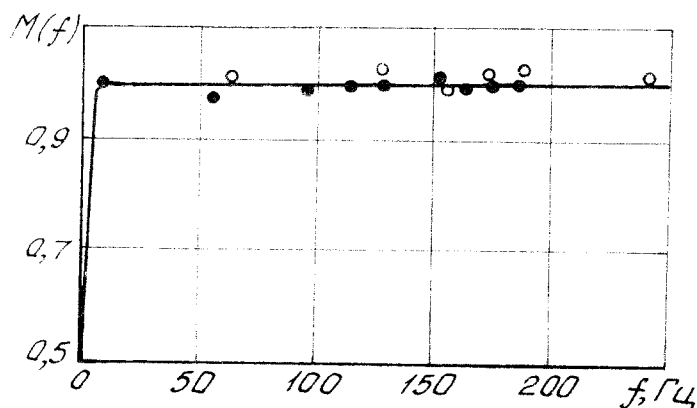


Рис. 3.1.3 – Экспериментальная АЧХ устройства для измерения пульсаций давления П1261 за вентилятором двигателя НК-86: о - эксперимент без наработки на двигателе; • - эксперимент после 11-и часовой наработки на двигателе при $P_{cp} = 120$ кПа; $T = 293$ К; $A_p = 5$ кПа; — - расчет

Для измерения пульсаций полного давления за компрессорами среднего и высокого давления изделия Р используются устройства П.1334 и П.1335, выполненные по схеме коррекции АЧХ цепи двумя сосредоточенными

дросселирующими элементами (рис. 3.1.4). Устройства отличаются между собой длиной подводщего волноводного канала и пределом измерения датчика пульсаций давления ДМИ. Устройство П.1334 (см. рис. 3.1.4а) состоит из волноводного канала 8, обеспечивающего акустическую связь точки, в которой производится измерение пульсаций давления, с датчиком пульсаций давления 3. Параллельно с подводщим каналом размещен согласованный канал 6, заглушенный со свободного конца вставкой 7. Подводящий и согласованный каналы выполнены из трубопровода (материал 12ХН18Н9Т). На выходе из подводщего канала и на входе в согласованный трубопровод установлены и закреплены сосредоточенные дроссели коррекции 4 из материала МР, обладающие сопротивлением, равным волновому сопротивлению канала. Датчик пульсаций давления 3 размещен в корпусе 10 и поджат гайкой 2. Динамическая камера датчика связана непосредственно с полостью между дросселями, а статическая камера - через акустический *RC* - фильтр 1. Дроссель акустического фильтра выполнен из материала МР малой пористости и обладает сопротивлением, превышающим более чем в 100 раз волновое сопротивление подводщего канала. Закрепление устройства на оболочке двигателя производится при помощи гайки 5. Для углового координирования устройства в проточной части изделия (рис. 3.1.5) имеется лимб 9.

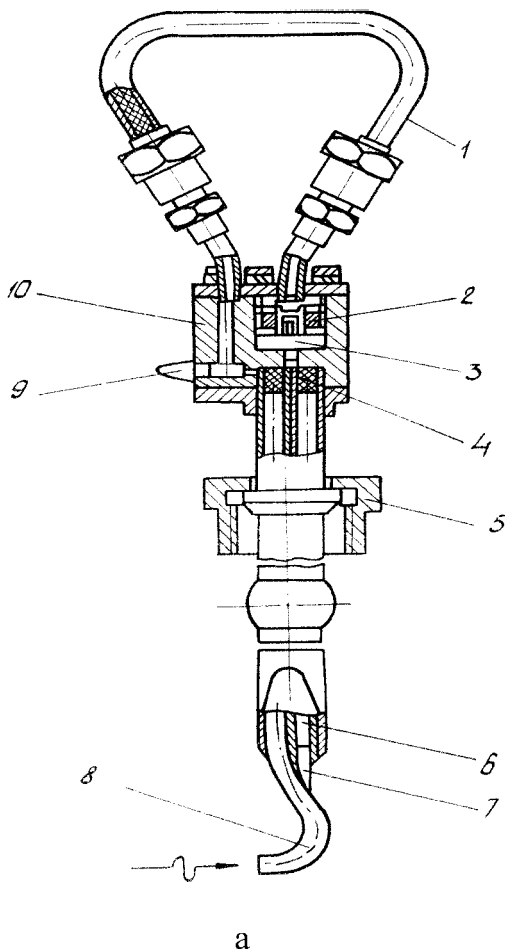


Рис. 3.1.4. Схема (а) и внешний вид (б) устройства для измерения пульсаций давления в компрессоре изделия Р : 1 - акустический *RC* - фильтр; 2 - гайка; 3 - датчик пульсаций давления типа ДМИ; 4 - корректирующий дроссель из пористого материала МР; 5 - крепежная гайка; 6 - согласованный волновод; 7 - заглушка; 8 - подводщий волновод; 9 - лимб установки устройства; 10 - корпус



Рис. 3.1.4. Окончание

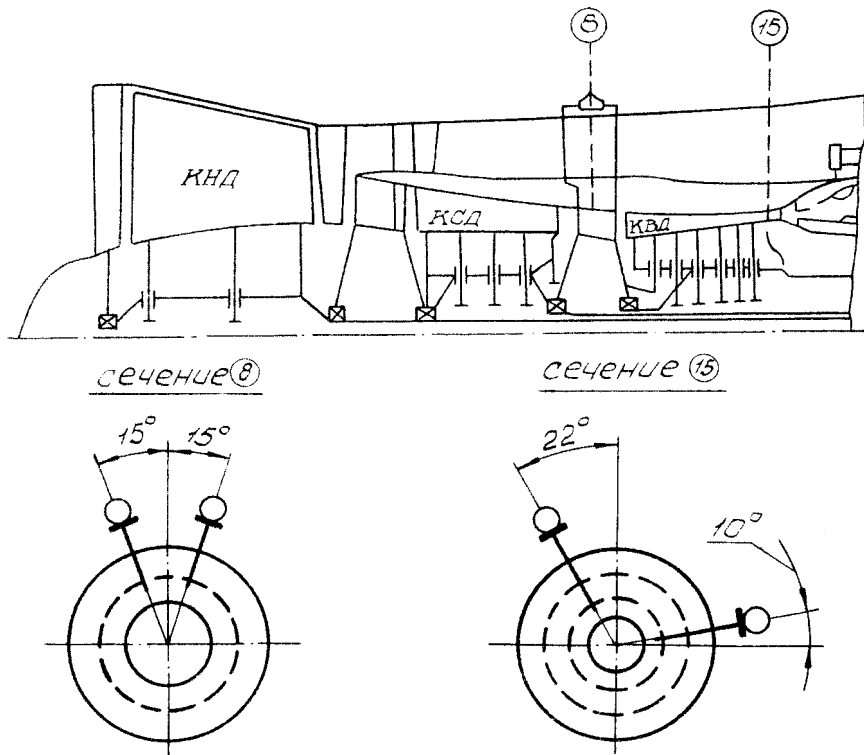


Рис. 3.1.5. Схема установки устройства для измерения пульсаций давления в проточной части изделия

В СКБМ по предложенным авторами рекомендациям разработано устройство для измерения пульсаций давления на входе в вентилятор ГТД и выходе из него при помощи дифференциального датчика, устанавливаемого на конце коротких подводных каналов. Для разгрузки от статического давления и обеспечения требуемой полосы пропускания на основе рекомендаций и методик данной работы спроектирован АФНЧ с капиллярно-стержневым дросселем. Выбор капиллярно-стержневого дросселя обусловлен необходимостью реализации большого пневматического сопротивления и стремлением снизить трудоемкость изготовления акустического фильтра. АФНЧ проектировался по следующим параметрам: статическое давление $1,01 \cdot 10^5$ Па, температура 298 К, допустимая неравномерность АЧХ зонда $\Delta_{дон} = \pm 0,02$, граничная частота 1 Гц. АЧХ с акустическим фильтром показана на рис. 3.1.6.

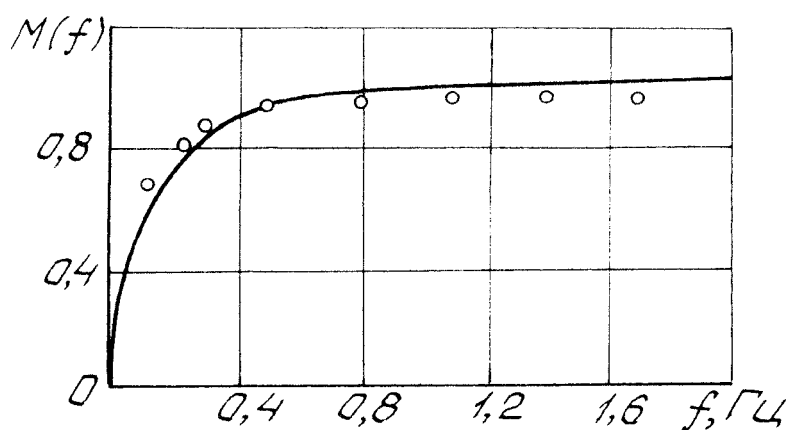


Рис. 3.1.6. Амплитудно-частотная характеристика датчика пульсаций давления ДМИ-0,6-1 с акустическим RC - фильтром: — расчет при $P_{cp} = 101,2$ кПа; $T = 293$ К; $V = 2,28 \cdot 10^{-6}$ м³; о - эксперимент

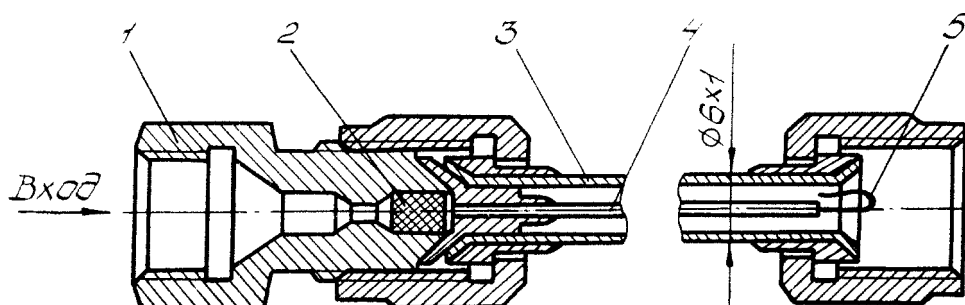


Рис. 3.1.7. Конструктивная схема RL - фильтра нижних частот с капиллярно-стержневым дросселем: 1 - корпус; 2 - фильтро-дросселирующий элемент; 3 - трубопровод; 4 - капиллярный канал; 5 - стержень

Акустический фильтр (рис. 3.1.7) состоит из трубопровода 3, изогнутого в рабочем состоянии таким образом, чтобы обеспечивалось его подключение к соответствующим штуцерам на корпусе датчика (на схеме не показан). Внутри трубопровода 3 установлена вставка с припаянным к ней капилляром 4 (1,2x0,2 мм), внутри которого установлен стержень 5 диаметром 0,68 мм. Для предохранения капиллярного канала от загрязнения на входе в него установлен фильтроэлемент 2 из пористого материала МР. Разработанная конструкция АФНЧ использовалась при летных испытаниях авиационного двигателя на летающей лаборатории.

3.2. Измерение пульсаций давления в форсажной камере ТРДДФ

Для измерения пульсаций давления в форсажной камере сгорания ТРДДФ по рекомендациям данной работы в МКБ «Сатурн» разработано измерительное устройство, выполненное на основе КЭ в виде сосредоточенного дросселя на входе в волноводный канал (рис. 3.2.1).

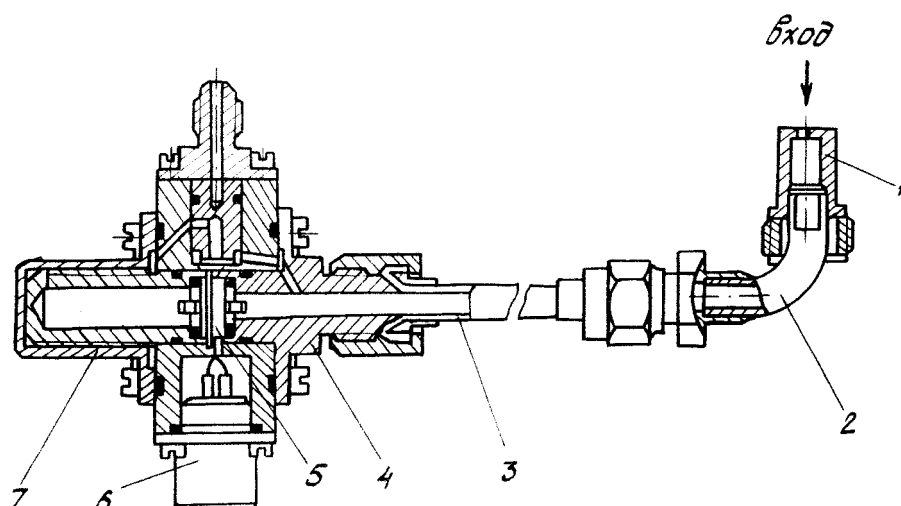


Рис. 3.2.1. Устройство для измерения пульсаций давления в форсажной камере ГТД: 1 - корректирующий жиклер; 2 - входной патрубков; 3 - волноводный канал; 4 - корпус; 5 - датчик пульсаций давления ДМИ; 6 - штепсельный разъем; 7 - акустический RC – фильтр

Устройство состоит из теплостойкого датчика пульсаций давления 5 (ДМИ-0,6Т), установленного в корпусе 4, волноводного канала 3, соединенного с точкой измерения через заборник пульсаций давления 1. На торце заборника 1, обращенном к камере сгорания, выполнен корректирующий дроссель диаметром 2,4 мм и длиной 3,5 мм. В корпус 4 вмонтированы элементы низкочастотного акустического RC - фильтра 7, обеспечивающего подавление пульсаций давления высокой частоты в разгрузочной камере датчика. Разработанное измерительное устройство прошло лабораторные испытания, в результате которых уточнены размеры корректирующего дросселя, обеспечивающего оптимальную коррекцию АЧХ измерительной цепи при длине волновода 0,33 м. Неравномерность АЧХ устройства в диапазоне частот 80...300 Гц составляет $\pm 25\%$. Разработанное устройство применялось при стендовых и летных испытаниях ТРДДФ. Использование новой схемы коррекции АЧХ измерительного канала позволило повысить точность измерения пульсаций давления в форсажной камере сгорания изделия при минимально возможных габаритах устройства и снизить массу измерительного устройства на 40 %.

3.3. Измерение динамического давления в поршневом двигателе

Одним из информативных параметров, по которому производится доводка поршневого двигателя внутреннего сгорания, является динамическое давление. В процессе экспериментальных исследований измеряются

колебания давления в диффузоре карбюратора, в камере сгорания, в картере и в выхлопной трубе. Из-за малости габаритов объекта исследования и ограниченности пространства под установку серийно выпускаемых датчиков колебаний давления применены устройства с подводными каналами, выполненные на основе дифференциальных датчиков типа ДМИ и капиллярных корректирующих элементов (рис. 3.3.1).

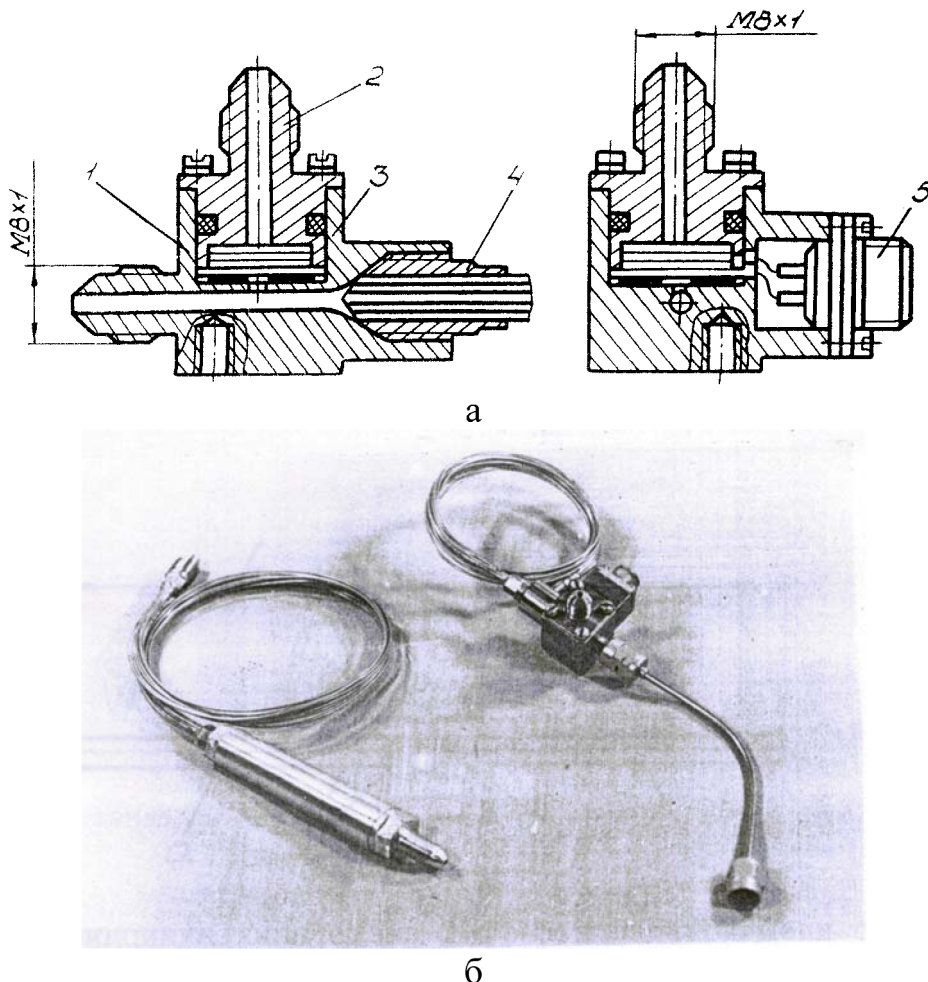


Рис. 3.3.1. Конструктивная схема (а) и внешний вид (б) устройства для измерения динамического давления в узлах поршневого двигателя: 1 - датчик пульсации давления ДМИ-0,6-1; 2 - штуцер статической камеры; 3 - корпус устройства; 4 - пучок капиллярных каналов; 5 - штепсельный разъем РС-4

Диаметр подводного канала ограничен максимально допустимым диаметром соединительного штуцера на изделии. Например, для измерения давления в карбюраторе диаметр штуцера должен быть не более 2 мм. Длина подводного трубопровода должна быть минимально допустимой, она определяется местом крепления устройства и уровнем температур газа в точке измерения. В результате макетирования на двигателе выбрана длина подводного трубопровода $l=0,1...0,2$ м.

В результате расчета капиллярного корректирующего элемента установлено, что при допустимой погрешности $\pm 20\%$, среднем давлении $1,3 \cdot 10^5$ Па (абс.), диаметре капилляров 0,6 мм и числе капилляров 11 шт. длина их должна быть 0,4 м. Требуемая длина одинарной согласованной линии $d_y 2$ при той же точности составляет 4 м.

С учетом выбранных параметров разработаны конструкции измерительных устройств (см. рис. 3.3.1). Корпус устройства выполнен таким, что подводный канал и корректирующий элемент соединяются осевым каналом плавно, без ступенчатых переходов. Полость чувствительного элемента датчика 1 соединена с осевым каналом радиальным отверстием диаметром 1 мм. Датчик 1 прижат к корпусу 3 цилиндрическим выступом штуцера статической камеры 2 через уплотнительное кольцо толщиной 0,3 мм. Корректирующий элемент со свободного конца закрыт заглушкой.

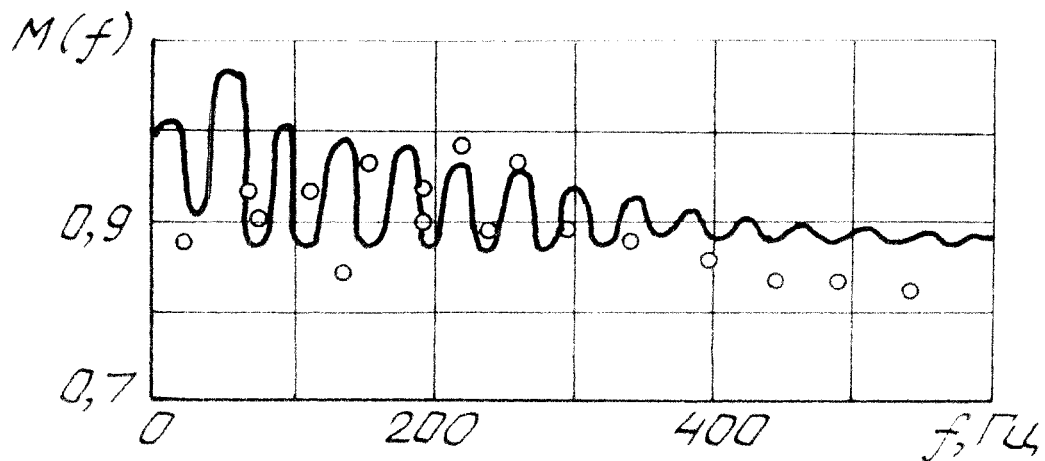


Рис. 3.3.2 – АЧХ устройства для измерения колебаний давления с датчиком ДМИ-0,6 и корректирующим элементом в виде согласованного трубопровода ($d = 2$ мм; $l = 0,2$ м; $V_0 = 15 \cdot 10^{-9}$ м³; $P_{cp} = 130$ кПа; $d_{кп} = 2$ мм, $l_{кп} = 4$ м, $N_{кп} = 1$ шт): — - расчет; о - эксперимент

Перед началом и после окончания экспериментов осуществляется продувка капиллярных и подводного каналов с целью исключения попадания капель жидкости в волновод и полость датчика пульсаций давления. Разработанные устройства позволяют измерять пульсации давления в диапазоне частот 0...600 Гц с наибольшей динамической погрешностью $\pm 20\%$ (рис. 3.3.2).

3.4. Измерение пульсаций давления в камере сгорания микроЖРД

Для измерения динамического давления в малогабаритных энергетических установках, например в микроЖРД, применяют либо охлаждаемый датчик пульсаций давления, либо цепь, включающую подводный канал, датчик пульсаций давления и КЭ, к которому предъявляются особые требования. Во-первых, подключение измерительной цепи не должно вносить заметного искажения в динамический процесс в объекте контроля, во-вторых, измерение пульсаций давления должно проводиться с минимальной динамической погрешностью в широком диапазоне частот. В данном разделе предлагается метод выбора параметров цепи с КЭ, при которых одновременно удовлетворяются оба указанных условия [27].

Предположим, что объект контроля - камеру сгорания (КС) можно представить в виде соединения источника колебаний расхода с внутренним импедансом Z_u и нагрузки с импедансом Z_H (рис.3.4.1). Тогда комплексная амплитуда колебаний давления в КС p_u определяется по соотношению

$$p_u = q_u (1/Z_u + 1/Z_H). \quad (3.4.1)$$

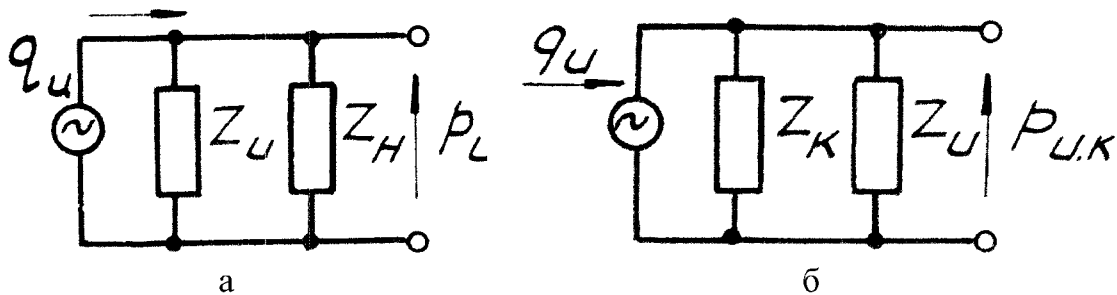


Рис. 3.4.1. Схема цепи с источником колебаний расхода: а - с присоединенной акустической нагрузкой; б - с присоединенной нагрузкой и устройством для измерения пульсаций давления

Подключение измерительной цепи к КС приводит в общем случае к изменению в ней колебаний давления. Предполагая независимость источника колебаний, определяем комплексную амплитуду колебаний давления в КС с измерительной цепью

$$p_{ук} = q_u (1/Z_{вх} + 1/Z_u + 1/Z_H), \quad (3.4.2)$$

где Z_{ex} - входной импеданс цепи. Если разделить почленно левые и правые части равенств (3.4.1) и (3.4.2), можно получить коэффициент вносимого затухания колебаний давления в КС

$$K_{вн.и} = \left| 1 + Z_u Z_n / [Z_{ex} (Z_u + Z_n)] \right|^{-1}. \quad (3.4.3)$$

Динамическая погрешность измерительной цепи определяется частотной функцией

$$W(j\omega) = p/p_{и.к}, \quad (3.4.4)$$

где p - комплексная амплитуда колебаний давления, регистрируемая датчиком измерительной цепи. Тогда суммарная погрешность измерения амплитуд колебаний давления определяется равенством

$$\Delta = 1 - K_{вн.и} |W(j\omega)|. \quad (3.4.5)$$

Рассмотрим выбор параметров измерительной цепи с дросселем коррекции на входе (рис. 3.4.2). При идеальном согласовании характеристик дросселя и канала, т.е. при $ReZ_d = Z_e$ (без учета потерь на трение по длине канала), датчик регистрирует колебания давления в КС без искажений. Это соответствует тому, что $|W(j\omega)| = 1$. Тогда погрешность измерения пульсаций давления определяется лишь вносимой погрешностью измерительной цепи.

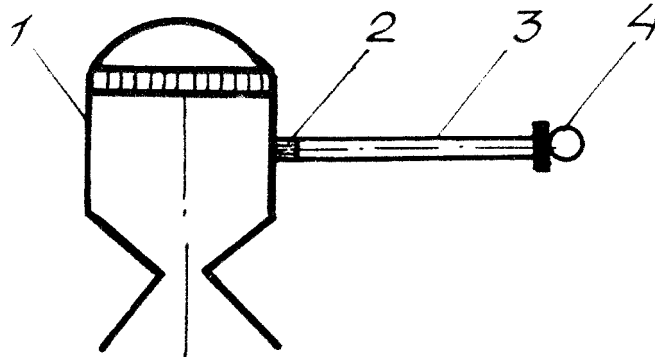


Рис. 3.4.2. Схема цепи измерения пульсаций давления: 1 - объект контроля; 2 - дроссель коррекции АЧХ цепи; 3 - подводящий трубопровод; 4 - датчик пульсаций давления

Предположим, что модуль входного импеданса форсуночной головки КС велик по сравнению с модулем импеданса полости КС и нагрузки - реактивного сопла. Учитывая активный характер импеданса сопла $Z_n = R_c$, реактивный - импеданса камеры $Z_u = 1/(jC_{кc}\omega)$, а также входной импеданс измерительной цепи в виде $Z_{ex} = Z_e [1 + jctq(\omega l/c)]$, из (3.4.3) находим коэффициент вносимого затухания

$$K_{\hat{a}i, \hat{e}} = \left| 1 + R_c \left[Z_{\hat{a}} (1 + j\omega R_c C_{\hat{e}n}) / [1 - jctq(\omega l / c)] \right] \right|^{-1}, \quad (3.4.6)$$

где $C_{\hat{e}n} = V_{\hat{e}n} / (\hat{e} P_{\hat{n}0})$ - акустическая емкость камеры; V_{kc} - объем камеры; $R_c = P_{cp} / \Delta_{\kappa} S_{kp} \sqrt{RT_{kc}}$ - сопротивление реактивного сопла при сверхкритическом истечении газов; T_{kc} - температура газа в камере; S_{kp} - площадь критического

сечения сопла; $\Delta_{\hat{e}} = \left\{ \hat{e} \left[2 / (\hat{e} + 1) \right]^{\frac{\hat{e}+1}{\hat{e}-1}} \right\}^{\frac{1}{2}}$. Для общности анализа вводим следующие безразмерные параметры: $\bar{Z}_{\hat{e}} = Z_{\hat{e}} / R_c$ - относительное волновое сопротивление канала; $\bar{C}_{\kappa} = lS / (\rho c C_{kc})$ - относительная акустическая емкость измерительного канала.

С учетом введенных безразмерных параметров уравнение (3.4.6) будет иметь следующий вид:

$$\hat{E}_{\hat{a}i, \hat{e}} = \left| \left(1 + j \frac{\pi}{2} \frac{\bar{\omega}}{\bar{Z}_{\hat{a}} \bar{C}_{\hat{e}}} \right) \left(1 - jctq \frac{\pi}{2} \bar{\omega} \right) \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{\bar{Z}_{\hat{a}}} + \frac{\pi \bar{\omega}}{2 \bar{Z}_{\hat{a}} \bar{C}_{\hat{e}}} ctq \frac{\pi}{2} \bar{\omega} + \\ + j \left(\frac{\pi \bar{\omega}}{2 \bar{Z}_{\hat{a}} \bar{C}_{\hat{e}}} - ctq \frac{\pi}{2} \bar{\omega} \right) \end{bmatrix} \right|^{-1}. \quad (3.4.7)$$

Подставив (3.4.7) в равенство (3.4.5) при $|W(j\bar{\omega})|=1$, получим:

$$\Delta = 1 - \left\langle \left[1 + \left(\frac{\pi \bar{\omega}}{2 \bar{Z}_{\hat{e}} \bar{C}_{\kappa}} \right)^2 \right] \left(1 + tq^2 \frac{\pi}{2} \bar{\omega} \right) \left\{ \left(1 + \frac{1}{\bar{Z}_{\hat{e}}} \right) tq \frac{\pi}{2} \bar{\omega} + \frac{\pi \bar{\omega}}{2 \bar{Z}_{\hat{e}} \bar{C}_{\kappa}} \right\}^2 + \left(\frac{\pi \bar{\omega}}{2 \bar{Z}_{\hat{e}} \bar{C}_{\kappa}} tq \frac{\pi}{2} \bar{\omega} - 1 \right)^2 \right\}^{-1} \right\rangle^{\frac{1}{2}}. \quad (3.4.8)$$

Из анализа формулы (3.4.8) и графиков, представленных на рис. 3.4.3, следует, что динамическая погрешность Δ в зависимости от частоты $\bar{\omega}$ изменяется по колебательной относительно оси абсциссы затухающей кривой. Погрешность Δ равна нулю при $\bar{\omega} = 2h$ ($h=0; 1; 2; \dots$) и принимает наибольшее из максимально возможных значений в диапазоне $\bar{\omega} \in [0; 1]$. Если принять указанные наибольшие значения за допустимую динамическую погрешность Δ_{don} , то можно, построив по уравнению (3.4.8) график $\Delta_{don} = \varphi(\bar{Z}_{\hat{e}}, \bar{C}_{\kappa})$ (рис. 3.4.4), определить требуемые относительные параметры цепи $\bar{Z}_{\hat{e}}, \bar{C}_{\kappa}$. Выбор диаметра и длины волновода осуществляется в следующем порядке. Вначале задаются площадью сечения канала S и определяют $\bar{Z}_{\hat{e}} = \rho c / (SR_c)$. Затем при заданной допустимой погрешности

$\Delta_{дон}$ и вычисленному значению \bar{Z}_6 из графика на рис. 3.4.4 находят \bar{C}_k . При известных \bar{C}_k и S требуемую длину канала вычисляют по формуле $l = \rho c^2 C_{kc} \bar{C}_k / S$. Если длина канала оказалась короткой (например, по условиям крепления датчика или ограждения его от чрезмерно высокой температуры), то уменьшают площадь S и вновь рассчитывают l . При этом следует, иметь в виду, что при слишком малых площадях S и больших длинах l сужается диапазон частот равномерного пропускания колебаний давления из-за повышения потерь энергии колебаний газа по длине канала.

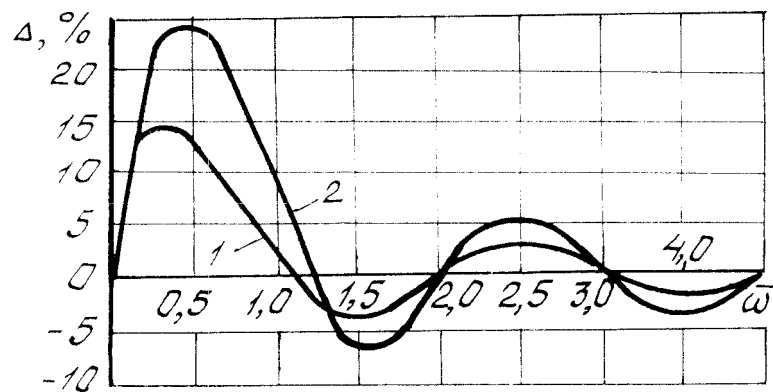


Рис. 3.4.3. Зависимость динамической погрешности измерения пульсаций давления в камере сгорания двигателя от частоты колебаний при $\bar{Z}_6 = 1$ и различных значениях \bar{C}_k : 1 - $\bar{C}_k = 0,2$; 2 - $\bar{C}_k = 0,4$

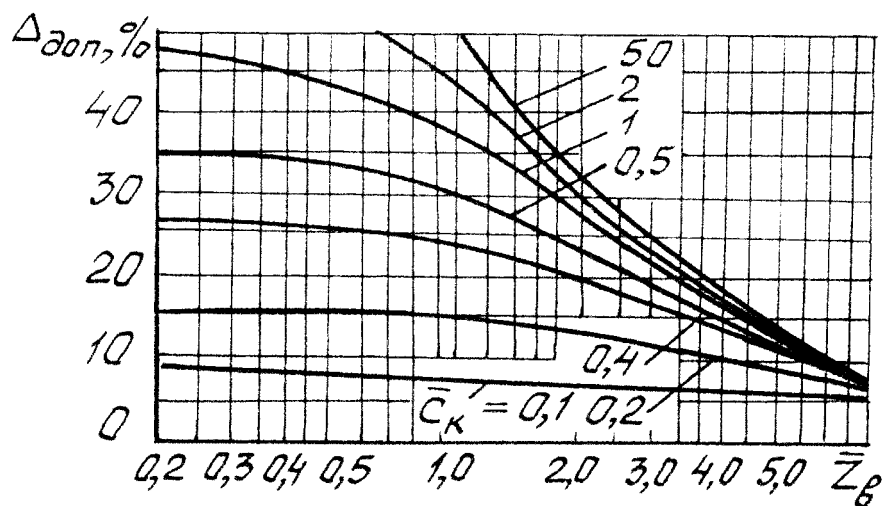


Рис. 3.4.4. Зависимость допустимой динамической погрешности устройства для измерения колебаний давления в камере сгорания микроЖРД от относительного волнового сопротивления канала \bar{Z}_6 при различных значениях

Соппротивление корректирующего дросселя определяют по формуле $ReZ_0 = \bar{Z}_c R_c$. После окончательного выбора параметров цепи (S, l, ReZ_0) необходимо провести контрольный расчет ее АЧХ с учетом потерь энергии колебаний газа по длине канала, податливости мембраны чувствительного элемента датчика давления и температурной неоднородности канала.

3.5. Волноводная цепь струйно-акустического датчика температуры газа

Важной проблемой, возникающей при применении перспективного струйно-акустического датчика температуры, является исключение влияния подводщего канала на характеристики устройства и усиление слабых сигналов, передаваемых от преобразователя температуры к датчику пульсаций давления [31]. Первая из указанных проблем связана с зависимостью характеристики преобразователя температуры от противодействия, а вторая обусловлена повышенным демпфированием колебаний в волноводе, особенно при низких средних давлениях, и отсутствием серийно выпускаемых микрофонных датчиков пульсаций давления, пригодных к работе в экстремальных условиях. Для решения поставленных задач предлагается подключить к выходу подводщего канала акустически согласованную нагрузку, при которой не возникают резонансные колебания газа (рис. 3.5.1).

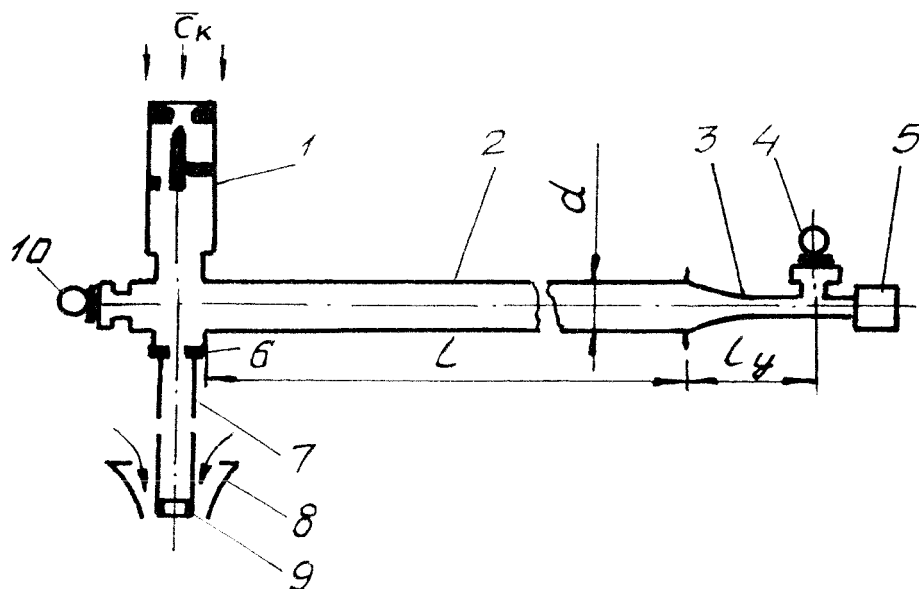


Рис. 3.5.1. Расчетная схема пневматической цепи струйно-акустического датчика температуры газа ГТД: 1 - преобразователь температуры газа; 2 - волноводный канал; 3 - акустический усилитель; 4 - датчик пульсаций давления; 5 - корректирующее устройство; 6 - входной дроссель газоотводного канала; 7 - газоотводный канал; 8 - эжектор; 9 - выходной дроссель газоотводного канала; 10 - охлаждаемый контрольный датчик пульсаций давления

Такой нагрузкой может быть КЭ с распределенными параметрами, например, в виде пучка капиллярных каналов. Для усиления сигнала на выходе из волновода предлагается применять акустический усилитель в виде рупорообразного насадка, площадь поперечного сечения которого изменяется по экспоненциальному закону. Выбор параметров капиллярного КЭ рассмотрен в главе 2 применительно к цепям систем измерения пульсаций давления.

В данном разделе представлены методика расчета частотных характеристик цепей струйно-акустического датчика температуры, выбраны параметры акустического усилителя и приведены результаты экспериментальной проверки эффективности разработанных средств коррекции. При расчете предполагается: струйно-акустический датчик температуры является идеальным источником колебаний расхода газа; потери энергии колебаний по длине волновода учитываются в соответствии с высокочастотной теорией [42,60]; потери колебательной энергии на стыке участков канала и теплообмен с окружающей средой пренебрежимо малы.

С учетом принятых допущений комплексные амплитуды колебаний давления и расхода в i -х сечениях акустической цепи (рис. 3.5.2) описываются зависимостями, выраженными через нормированные параметры:

при $\bar{\omega} \leq 256D_n / (\pi \bar{d}_i^2)$

$$Z'_{ei} = \frac{1}{\bar{d}_i^2} \left[1 - j \frac{64D_n}{\pi \bar{d}_i^2 \omega} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad \bar{\Gamma}_i = j \frac{\pi \bar{\omega}}{2} \left[1 - j \frac{64D_n}{\pi \bar{\omega} \bar{d}_i^2} \right], \quad (3.5.1)$$

при $\bar{\omega} > 256D_n / (\pi \bar{d}_i^2)$

$$\bar{Z}'_{ei} = \frac{1}{\bar{d}_i^2} \left[\frac{4(\kappa-1)}{\bar{d}_i \sqrt{\text{Pr}}} \sqrt{\frac{D_n}{\pi \bar{\omega}}} + j \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{4}{\bar{d}_i} \sqrt{\frac{D_n}{\pi \bar{\omega}}} + j \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$\bar{\Gamma}'_{ei} = \frac{\pi \bar{\omega}}{2} \left[\frac{4(\kappa-1)}{\bar{d}_i \sqrt{\text{Pr}}} \sqrt{\frac{D_n}{\pi \bar{\omega}}} + j \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{4}{\bar{d}_i} \sqrt{\frac{D_n}{\pi \bar{\omega}}} + j \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (3.5.2)$$

$$\bar{d}_i = d_i / d.$$

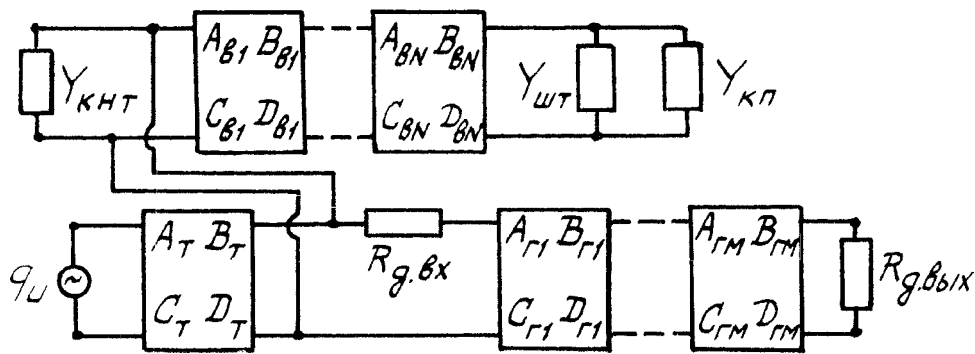


Рис. 3.5.2. Структурная схема пневматической цепи струйно-акустического датчика температуры с капиллярным КЭ

Входные акустические проводимости датчиков пульсаций давления находим по известным формулам:

$$\bar{Y}_{\text{кнт}} = j\pi\bar{\omega}\bar{V}_{\text{кнт}} / 2; \quad \bar{Y}_{\text{шт}} = j\pi\bar{\omega}\bar{V}_{\text{шт}} / 2,$$

где $\bar{V}_{\text{кнт}} = V_{\text{кнт}} / lS$; $\bar{V}_{\text{шт}} = V_{\text{шт}} / lS$ - нормированные объемы полостей контрольного и штатного датчиков. Входную проводимость пучка капиллярных каналов определяем по выражению $\bar{Y}_{\text{еі}} = N_{\text{еі}} \bar{d}_{\text{еі}}^2 \text{th}(\bar{\Gamma}_{\text{еі}} \bar{l}_{\text{еі}}) / \bar{Z}'_{\text{еі}}$, а относительные сопротивления дросселей газоотводного канала рассчитываем по формулам $\bar{R}_{\text{д.вх}} = R_{\text{д.вх}} S / (\rho c)$; $\bar{R}_{\text{д.вых}} = R_{\text{д.вых}} S / (\rho c)$. Для анализа влияния пневматической цепи на динамическую точность датчика температуры при докритических режимах его работы рассмотрим график модуля входного комплексного сопротивления цепи (рис. 3.5.3), рассчитанного импедансным методом с помощью ПК по структурной схеме (см. рис. 3.5.2).

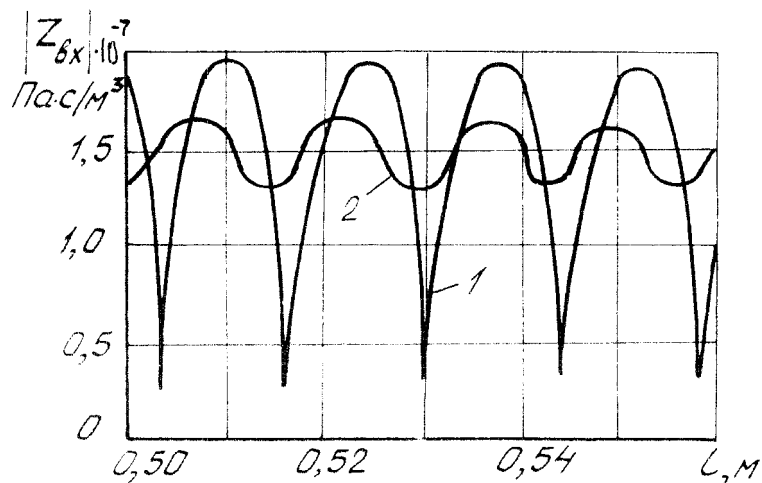


Рис. 3.5.3. Зависимость модуля входного импеданса волноводной цепи струйно-акустического датчика температуры ($l = 0,5$ м; $d = 8$ мм; $T = 293$ К; $P_{\text{ср}} = 1,01 \cdot 10^5$ Па; $V_{\text{шт}} = 50 \cdot 10^{-9}$ м³) от удлинения подводящего канала при частоте колебаний 12,6 кГц: 1 - без КЭ; 2 - с капиллярным КЭ ($d_{\text{кн}} = 0,8$ мм; $l_{\text{кн}} = 0,25$ м; $N_{\text{кн}} = 100$ шт.)

Из рис. 3.5.3 следует, что при резонансных режимах модуль входного импеданса цепи минимален, что соответствует повышенному динамическому перепаду давления на датчике и, как следствие, более высокой частоте автоколебаний [60]. Таким образом, при докритических режимах частота колебаний давления на выходе из датчика температуры будет изменяться обратно пропорционально модулю входного импеданса присоединенной цепи. Резонансные колебания в цепи можно исключить, подключив на выходе из волновода капиллярный КЭ, методика выбора параметров которого изложена в главе 2. При диаметре волновода $d=8$ мм и выбранном диаметре капилляров $d_{kn}=0,8$ мм число последних должно быть $N_{kn}=100$. При длине волновода 1,4 м и среднем давлении $0,5 \cdot 10^5$ Па (абсол.) коэффициент диссипации равен $D_n=8,46 \cdot 10^{-4}$. При этом температура газа принималась равной температуре холодного участка 293 К. При допустимой динамической погрешности $\Delta_{oon}=\pm 0,2$ относительная длина капилляров составляет $\bar{l}_{kn}=3,5$ или $l_{kn}=4,9$ м. Такой расчет проводили, исходя из допустимой неравномерности АЧХ цепи в диапазоне частот от 0 до 15 кГц. Так как рабочий диапазон частот струйно-акустического датчика температуры составляет (7...15) кГц, то в результате контрольного расчета АЧХ цепи удалось снизить длину капилляров до 0,25 м. При подключении капиллярного КЭ существенно снизилась колебательность модуля входного импеданса присоединенной цепи, что должно способствовать стабилизации работы датчика температуры.

Усиление акустических колебаний давления осуществляется рупорообразным насадком, в котором площадь поперечного сечения изменяется по экспоненциальной зависимости $S_x = S_{нб} \exp(\alpha_s x)$, причем общая длина насадка должна быть не меньше длины волны передаваемых колебаний ($\alpha_s = l_n (S_{нб} / S_{нм}) l_y$). В связи с этим акустический усилитель представим в виде последовательного соединения однородных участков (рис. 3.5.4), площади проходных сечений которых отличаются на одинаковую величину $\Delta S = (S_{нб} - S_{нм}) / k$, где $k \geq 2$ - число элементов неоднородного участка усилителя.

Тогда длины участков и площади проходных сечений усилителя определяют по формулам:

$$l_{y1} = \frac{1}{\alpha_s} l_n \left[(S_{нб} - \Delta S / 2) / S_{нб} \right]; \quad S_1 = S_{нб};$$

$$l_{yk} = \frac{1}{\alpha_s} l_n \left[(S_k - \Delta S) / S_{k-1} \right]; \quad S_k = S_{k-1} - \Delta S; \quad k = 2, \dots, (k-1);$$

$$l_{yk} = \frac{1}{\alpha_S} l_n \left[(S_{k-1} - \Delta S / 2) / S_{k-1} \right]; \quad S_k = S_{nm}.$$

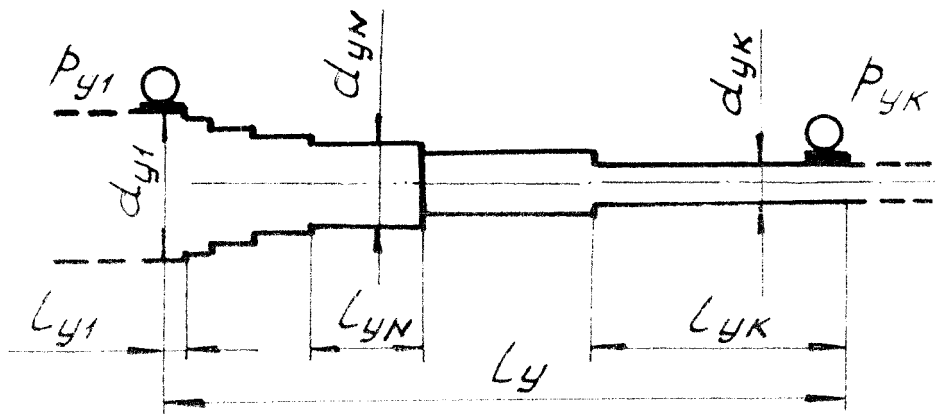


Рис. 3.5.4. Расчетная схема акустического усилителя колебаний давления

Предположим, что к выходу акустического усилителя подсоединена акустическая нагрузка, имеющая модуль входного импеданса, равный волновому сопротивлению усилителя. Тогда колебания на выходе из усилителя "проходят" в нагрузку без отражения и датчик пульсаций давления регистрирует лишь падающие, усиленные колебания давления. При этом коэффициент акустического усиления колебаний давления определяется по отношению $\hat{E}_y = |p_{yk} / p_{y1}|$, где p_{y1} , p_{yk} - комплексные амплитуды колебаний давления во входном и выходном сечениях усилителя. АЧХ или K_y усилителя с не отражающей нагрузкой на конце рассчитывают на ПК импедансным методом с использованием зависимостей вида (3.5.1), (3.5.2), в которых в качестве базовых значений параметров приняты l_y , d_{yk} , то есть $D_n = v l_y / (c d_{yk}^2)$; $\bar{d}_{yk} = d_{yk} / d_{y1}$; $\bar{l}_{yk} = l_{yk} / l_y$; $\bar{\omega} = 2 \omega l_y / (\pi c)$. Известно, что в идеальном случае при экспоненциальном изменении площади сечения по длине канала усилителя коэффициент усиления составляет $\hat{E}_y = 1 / \bar{d}_{yk}$ [31,47,67]. В реальных условиях из-за несогласованности акустической нагрузки и влияния трения по длине канала усилителя могут быть отличия в коэффициенте усиления. Характер изменения АЧХ усилителя с КЭ (см. Рис. 3.5.5, 3.5.6) таков, что на определенной частоте колебаний сначала происходит усиление акустических колебаний, а затем наблюдается их спад из-за увеличения потерь энергии колебаний по длине усилителя (рис. 3.5.7).

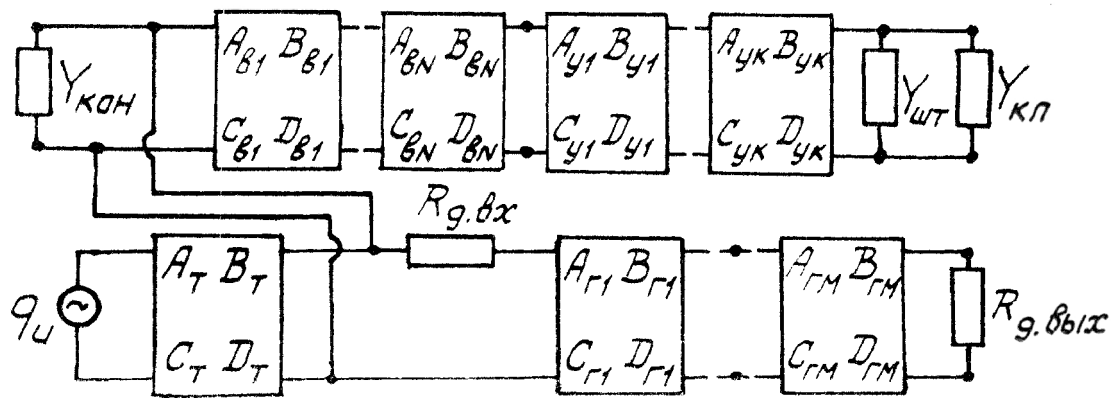


Рис. 3.5.5. Структурная схема пневматической цепи струйно-акустического датчика температуры с акустическим усилителем и капиллярным КЭ

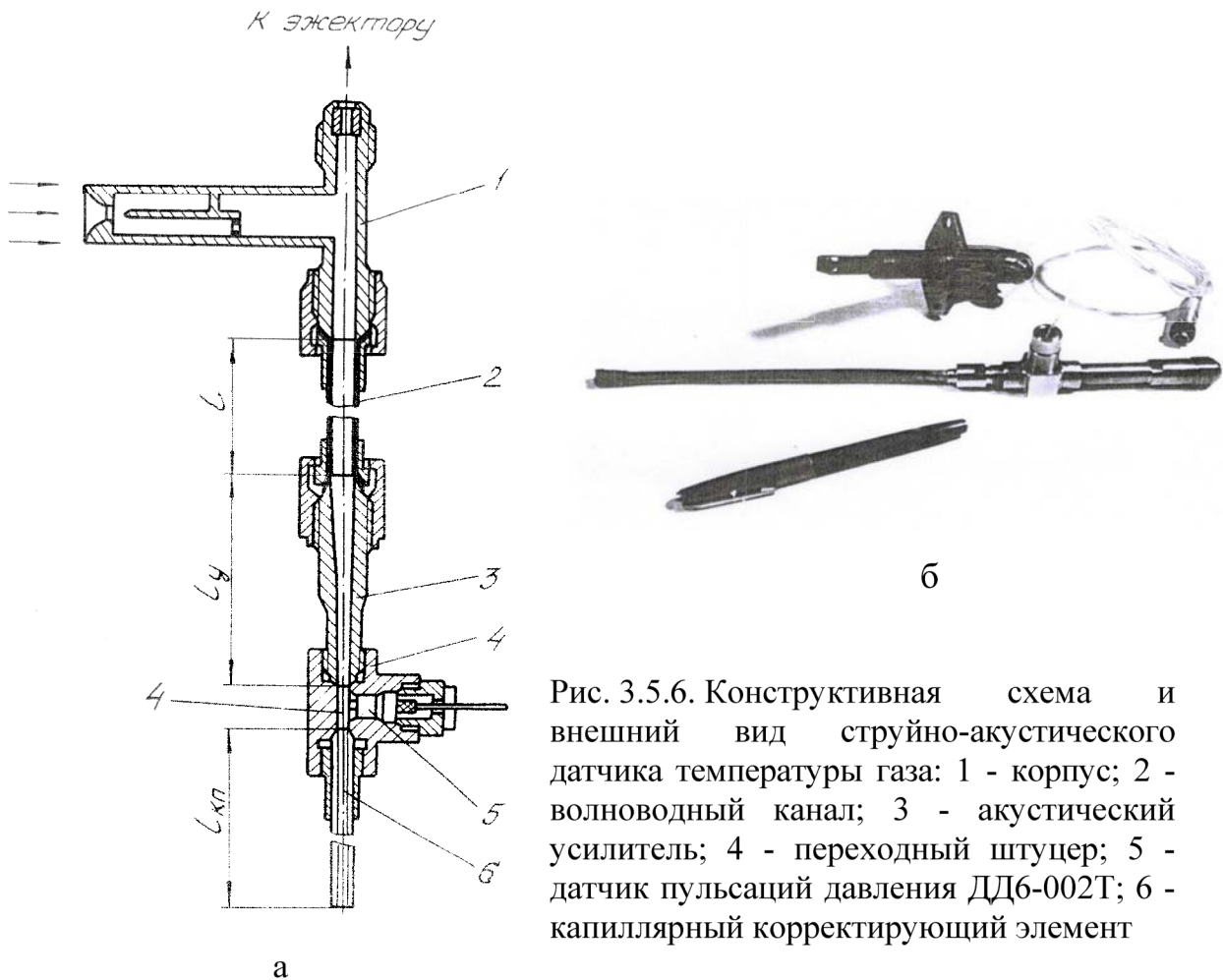


Рис. 3.5.6. Конструктивная схема и внешний вид струйно-акустического датчика температуры газа: 1 - корпус; 2 - волноводный канал; 3 - акустический усилитель; 4 - переходный штуцер; 5 - датчик пульсаций давления ДД6-002Т; 6 - капиллярный корректирующий элемент

Принимая диапазон допустимой неравномерности АЧХ усилителя $\pm \Delta_{доп}$ относительно K_y нижней $\bar{\omega}_{нм}$ и верхней $\bar{\omega}_{нб}$ - пределы диапазона частот усиливаемых колебаний давления при заданном D_n .

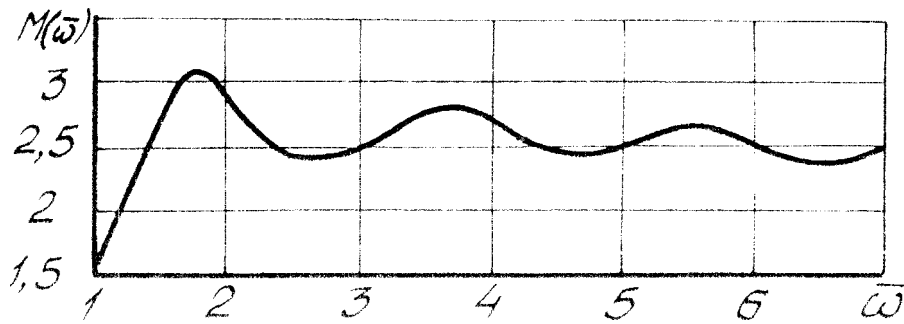


Рис. 3.5.7. АЧХ акустического усилителя с капиллярным КЭ при $K_y=3$ и коэффициенте диссипации $D_n=2 \cdot 10^{-3}$

Определив таким образом $\bar{\omega}_{нм}$, $\bar{\omega}_{нб}$ при различных D_n , строят зависимости $\bar{\omega}_{нм} = \varphi_1(D_n)$, $\bar{\omega}_{нб} = \varphi_2(D_n)$ для выбранных параметров КЭ (рис. 3.5.8). Используя эти зависимости, можно выбирать параметры акустического усилителя. Для этого при заданном D_n из графика на рис. 3.5.8 находят $\bar{\omega}_{нм}$, соответствующую $(D_n)_{\min}$. При известной скорости звука и заданной физической частоте $\omega_{нм}$ рассчитывают требуемую длину усилителя $l_y = \pi c \bar{\omega}_{нм} / (2\omega_{нм})$, затем при заданной $\omega_{нб}$ находят нормированную частоту $\bar{\omega}_{нб} = \pi c \omega_{нб} / (2l_y)$ и по графику $\bar{\omega}_{нб} = \varphi_2(D_n)$ для соответствующего K_y определяют D_n . При известных l_y, c, v находят диаметры широкого и узкого концов усилителя: $d_{y1} = \sqrt{vl_y / (D_n c)}$; $d_{yk} = d_{y1} / k_y$. Частота колебаний $\bar{\omega}_{нм}$, соответствующая найденному D_n , будет несколько больше первоначального значения. Поэтому по изложенному алгоритму производят уточнение длины и диаметров концевых сечений усилителя.

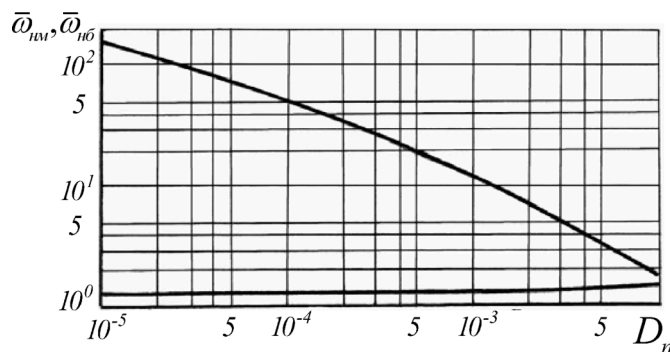


Рис. 3.5.8. Зависимость нижней $\bar{\omega}_{нм}$ и верхней $\bar{\omega}_{нб}$ границ диапазона частот усиливаемых колебаний давления от коэффициента диссипации D_n акустического усилителя при $K_y = 3 \pm 0,6$

В качестве примера рассмотрим расчет акустического усилителя для повышения уровня колебаний давления в цепи струйно-акустического датчика температуры (см. рис. 3.5.6) при среднем давлении 0,105 МПа (абс.)

и температуре 293 °К. Диапазон частот усиливаемых в 2,5 раза (с допуском $\Delta_{\text{дон}} = \pm 0,2$) колебаний давления составляет (7...15) кГц. Рассчитанные по изложенной методике параметры акустического усилителя таковы: $l_y = 48$ мм, $d_{yк} = 3$ мм, $d_{y1} = 8$ мм. Из рис. 3.5.9 следует, что экспериментальные данные качественно подтверждают теоретические зависимости.

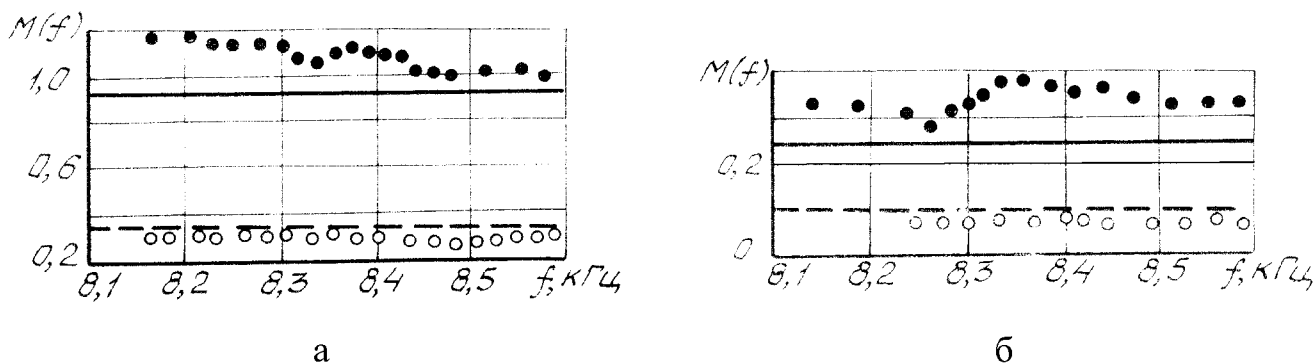


Рис. 3.5.9. АЧХ пневматической цепи датчика температуры ($d = 8$ мм; $l = 1,45$ м) при $P_{cp} = 0,103$ МПа (а) и $P_{cp} = 0,02$ МПа (абс) (б): — — - расчет; о - эксперимент без усилителя с капиллярным КЭ ($d_{кп} = 0,8$ мм; $l_{кп} = 0,53$ м; $N_{кп} = 100$ шт.) — — - расчет; • - эксперимент с акустическим усилителем ($d_{нб} = 8$ мм; $d_{нм} = 3$ мм; $l_y = 80$ мм) и капиллярным КЭ ($d_{кп} = 0,5$ мм; $l_{кп} = 0,4$ м; $N_{кп} = 34$ шт.)

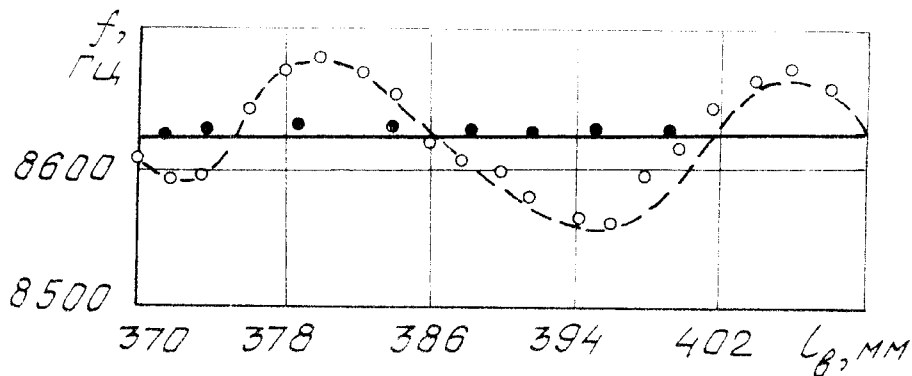


Рис. 3.5.10. Зависимость частоты колебаний давления на выходе из акустического датчика температуры газа при изменении длины волноводной цепи с усилителем ($P = 1,2 \cdot 10^5$ Па, $P = 1,02 \cdot 10^5$ Па): о - эксперимент; — — - аппроксимация без КЭ; • - эксперимент; — — - аппроксимация с капиллярным КЭ ($d_{кп} = 0,5$ мм; $l_{кп} = 0,4$ м; $N_{кп} = 25$ шт.)

При применении разработанного акустического усилителя достигается усиление сигнала в цепи датчика температуры газа в 2,5...3 раза при средних давлениях 0,02 и 0,101 МПа (абс.). Исследованиями подтверждена реальная возможность стабилизации характеристики струйно-акустического датчика

температуры газа с усилителем путем подключения капиллярного КЭ (рис. 3.5.10).

3.6. Акустический зонд контроля вибронапряжения в лопатке турбомашин при стендовых испытаниях

Эффективным методом контроля вибронапряжений при циклических испытаниях лопаток турбомашин в высокотемпературных условиях является предложенный авторами акустический метод, основанный на пропорциональной зависимости амплитуд виброскорости пера лопатки и вибронапряжения у ее корня при колебаниях по первой форме [23]. В данном разделе изложена методика выбора параметров акустической цепи контроля вибронапряжений и приведены результаты ее экспериментальных исследований при температуре окружающей среды и в высокотемпературных условиях. Амплитуда скорости волн в воздушной среде A_{vb} над поверхностью вибрирующей лопатки пропорциональна амплитуде виброскорости ее пера A_{vd} :

$$A_{vb} = \chi_l A_{vd}, \quad (3.6.1)$$

где χ_l - коэффициент, учитывающий средний зазор между испытываемой лопаткой и входом в цепь, форму и размеры лопатки. В акустической волне амплитуды скорости и давления связаны соотношением $A_p = \rho c A_{vd}$, поэтому при известном (измеренном) давлении можно определить с учетом (3.6.1) амплитуду виброскорости пера лопатки $A_{vd} = A_p / (\rho c \chi_l)$ и амплитуду вибронапряжения A_σ у ее корня [10,28,66]. Однако для каждой лопатки присущи свои коэффициенты связи указанных параметров, теоретическое определение которых представляет собой сложный процесс, поэтому для нахождения зависимости $A_\sigma = f(A_p)$ целесообразно воспользоваться начальной калибровкой, например, по тензорезистору. В условиях повышенных температур предлагается измерять пульсации давления над вибрирующей лопаткой измерительной цепью с КЭ. Из рассмотренных выше схем коррекции целесообразно применять схему с КЭ в виде дросселя из пористого материала МР, устанавливаемого в подводящем канале (рис. 3.6.1). При этом дроссель одновременно препятствует лучевому нагреву датчика пульсаций давления.

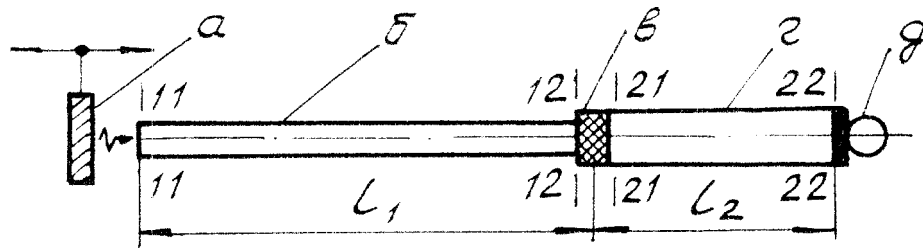


Рис. 3.6.1. Схема акустической цепи устройства для контроля вибронапряжений в лопатке турбомашин при высоких температурах: *a* - вибрирующая лопатка; *б* - горячий участок подводящего канала; *в* - дроссель коррекции; *г* - холодный участок подводящего канала; *д* - датчик пульсаций давления

При выводе расчетных зависимостей предполагается: температура воздуха по длине внутреннего (в печи) и наружного подводящего трубопроводов постоянна; потери колебательной энергии волн по длине трубопроводов пренебрежимо малы; акустический импеданс дросселирующего элемента содержит только активную составляющую; податливость мембраны чувствительного элемента датчика пульсаций давления не учитывается. При принятых допущениях связь между комплексными амплитудами колебаний давления и объемного расхода воздуха в характерных сечениях цепи (см. рис. 3.6.1) выражается формулами:

$$\left. \begin{aligned} p_{11} &= p_{12} \cos \frac{\omega l_1}{c_1} + j Z_{e1} q_{12} \sin \frac{\omega l_1}{c_1}; & p_{21} &= p_{22} \cos \frac{\omega l_2}{c_2}; \\ q_{21} &= j \frac{1}{Z_{e2}} p_{22} \sin \frac{\omega l_2}{c_2}; & p_{12} - p_{21} &= R_0 q_{21}; & q_{21} &= q_{12}, \end{aligned} \right\} \quad (3.6.2)$$

где $Z_{e1} = \rho_1 c_1 / S_1$; $Z_{e2} = \rho_2 c_2 / S_2$ - акустические волновые сопротивления внутреннего и наружного трубопроводов. В результате преобразования формул (3.6.2) получим следующую зависимость для частотной функции цепи:

$$\frac{p_{21}}{p_{11}} = \left[\cos \frac{\omega l_1}{c_1} \cos \frac{\omega l_2}{c_2} - \frac{Z_{e1}}{Z_{e2}} \sin \frac{\omega l_1}{c_1} \sin \frac{\omega l_2}{c_2} + j \frac{R_0}{Z_{e2}} \cos \frac{\omega l_1}{c_1} \sin \frac{\omega l_2}{c_2} \right]. \quad (3.6.3)$$

АЧХ измерительной цепи на основании (3.6.3) рассчитывают по формуле

$$\left| \frac{p_{21}}{p_{11}} \right| = \left[\left(\cos \frac{\omega l_1}{c_1} \cos \frac{\omega l_2}{c_2} - \frac{Z_{e1}}{Z_{e2}} \sin \frac{\omega l_1}{c_1} \sin \frac{\omega l_2}{c_2} \right)^2 + \left(\frac{R_0}{Z_{e2}} \cos \frac{\omega l_1}{c_1} \sin \frac{\omega l_2}{c_2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.6.4)$$

Из анализа (3.6.4) следует, что для передачи колебаний давления без динамических искажений по амплитуде необходимо выполнение равенств:

$$\omega l_1 / c_1 = \omega l_2 / c_2; \quad Z_{e1} = Z_{e2}; \quad R_d = 2Z_{e2}. \quad (3.6.5)$$

Скорость распространения волн в участках волноводного канала определяют по формулам:

$$\tilde{n}_1 = \sqrt{\hat{e}RT_1}; \quad \tilde{n}_2 = \sqrt{\hat{e}RT_2}. \quad (3.6.6)$$

Тогда с учетом (3.6.5) и (3.6.6) условия выбора конструктивных параметров цепи можно представить в виде:

$$l_1 / l_2 = \sqrt{T_2 / T_1}; \quad S_1 / S_2 = \sqrt{T_2 / T_1}. \quad (3.6.7)$$

При выбранных в соответствии с (3.6.7) параметрах трубопроводов и акустическом сопротивлении дросселя $R_d = 2\rho_2 c_2 / S_2$ колебания давления передаются от входа устройства к его выходу (датчику) без амплитудных искажений. При известной A_p амплитуда вибронапряжения в перо лопатки определяется по калибровочной зависимости $A_\sigma = f(A_p)$.

Экспериментальная проверка метода проводилась при комнатной температуре и в условиях высоких температур. Для испытания устройства при комнатной температуре была изготовлена плоская лопатка с первой резонансной частотой колебаний 1060 Гц. Подводящий канал измерительной цепи состоял из двух участков длиной по 210 мм с внутренним диаметром 4 мм. На выходе из подводящего канала размещался датчик пульсации давления ДМИ-0,6. На стыке участков канала устанавливался пористый дроссель из МР с сопротивлением, равным удвоенному волновому сопротивлению канала. Устройство ориентировалось перпендикулярно поверхности испытываемой лопатки на расстоянии трех диаметров канала от конца лопатки вдоль ее оси с зазором H , равным (0,5...10) мм.

В процессе испытаний изменялись средний зазор H и амплитуда виброперемещений пера лопатки, которые контролировались оптическим методом. Установлено, что амплитуда колебаний давления линейно зависит от амплитуды виброперемещений пера лопатки, а следовательно, и от виброскорости. При амплитуде виброперемещения пера лопатки 0,5 мм амплитуда колебаний давления составляет 300 Па. Эффективность метода оценивалась также при вибрационных испытаниях лопаток 2-, 5-, 6-, II- и 14-й ступеней компрессора и 1-й, 3-й ступеней турбины авиационного ГТД. В процессе испытаний лопаток 2-й ступени компрессора и 1-й ступени турбины была проверена линейность характеристики измерительной цепи при различных средних зазорах H .

Из рис. 3.6.2, 3.6.3 следует, что амплитуда излучаемых вибрирующей лопаткой волн давления пропорциональна амплитуде ее вибронапряжения.

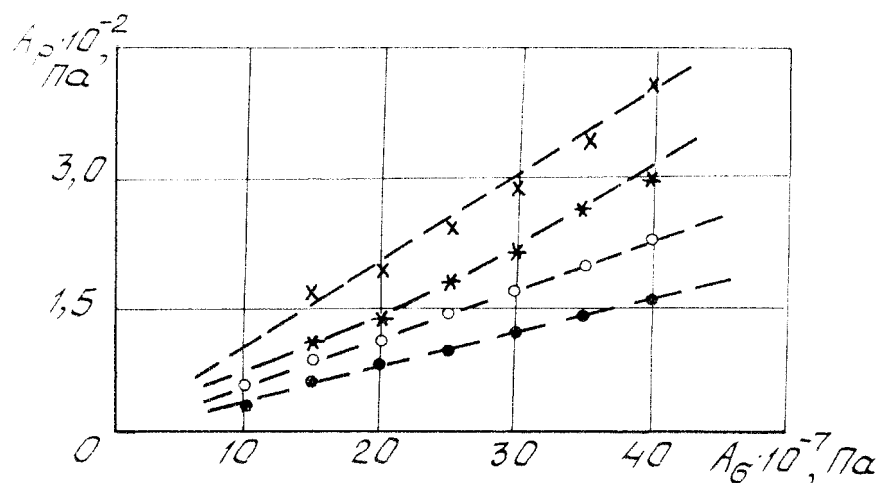


Рис. 3.6.2. Зависимость амплитуды акустических колебаний давления над лопаткой 2-й ступени компрессора от амплитуды ее виброн нагружения при различных средних зазорах H : \times - $H = 2$ мм; $*$ - $H = 6$ мм; o - $H = 8$ мм; \bullet - $H = 10$ мм

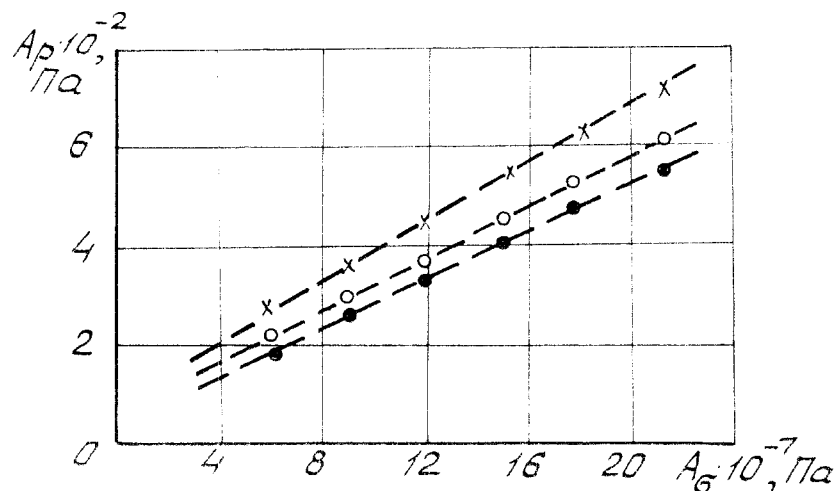


Рис. 3.6.3. Зависимость амплитуды акустических колебаний давления над лопаткой 1-й ступени турбины от амплитуды ее виброн нагружения при различных средних зазорах H : \times - $H = 6$ мм; o - $H = 8$ мм; \bullet - $H = 10$ мм

Нелинейность амплитудной характеристики цепи при резонансных частотах лопаток в диапазоне виброн напряжений у корня $(0...40) \cdot 10^7$ Па не превышает $\pm 5\%$. При увеличении зазора на 20% показания датчика давления снижаются приблизительно на 10%. Для определения рационального места установки акустического устройства над поверхностью испытываемой лопатки было исследовано поле пульсаций давлений вдоль хорды лопаток 6-й ступени компрессора и 1-й ступени турбины. Из рис. 3.6.4 следует, что наибольшая амплитуда волн давления наблюдается вдоль осевой линии, т.е. в середине хорды. Выяснено также (рис. 3.6.5), что при

отклонении входного канала цепи от перпендикулярного к поверхности лопатки положения на $\pm 15^\circ$ показания датчика пульсаций давления находятся в пределах точности эксперимента ($\pm 2\%$). Испытания в высокотемпературных условиях показали аналогичные результаты (рис. 3.6.6).

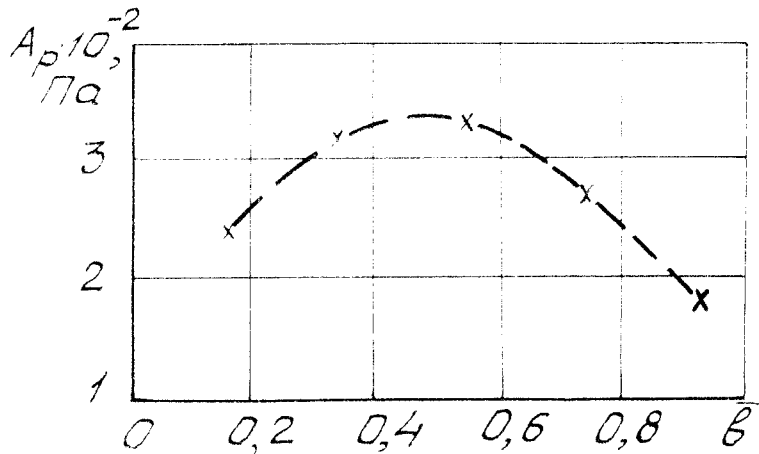


Рис. 3.6.4. Зависимость амплитуды акустических колебаний давления над лопаткой 6-й ступени компрессора от места установки измерительного устройства вдоль её хорды при $H = 6$ мм

Весьма важна при длительных испытаниях стабильность характеристик средств контроля и измерения параметров. В результате испытаний разработанного устройства в высокотемпературных условиях в течение 8,5 часов установлено, что в пределах точности эксперимента относительные показания датчика пульсаций давления неизменны. При применении разработанных устройств сокращается число досрочно снятых с длительных вибрационных испытаний лопаток из-за повреждения тензорезисторных датчиков вибронапряжений.

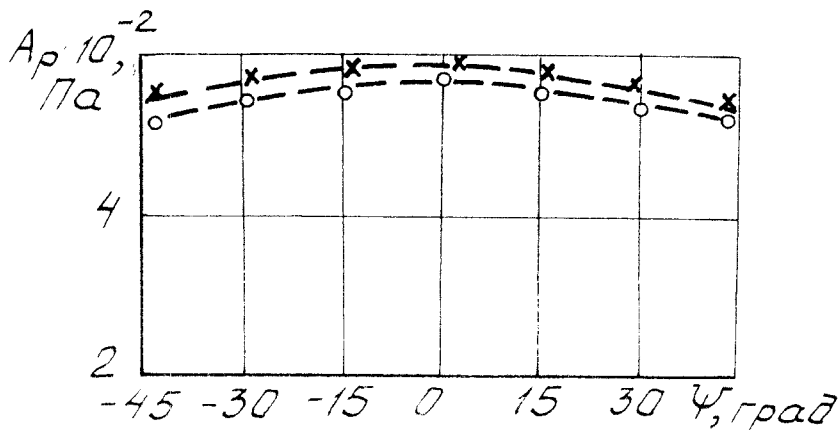


Рис. 3.6.5. Зависимость амплитуды акустических колебаний давления над лопаткой 1-й ступени турбины от угла установки измерительного устройства: \times - в плоскости, перпендикулярной оси лопатки; o - в плоскости оси лопатки

В отличие от аналогичных пневматических устройств для измерения виброперемещений в предлагаемом исключается искажение температурного поля вокруг объекта испытаний.

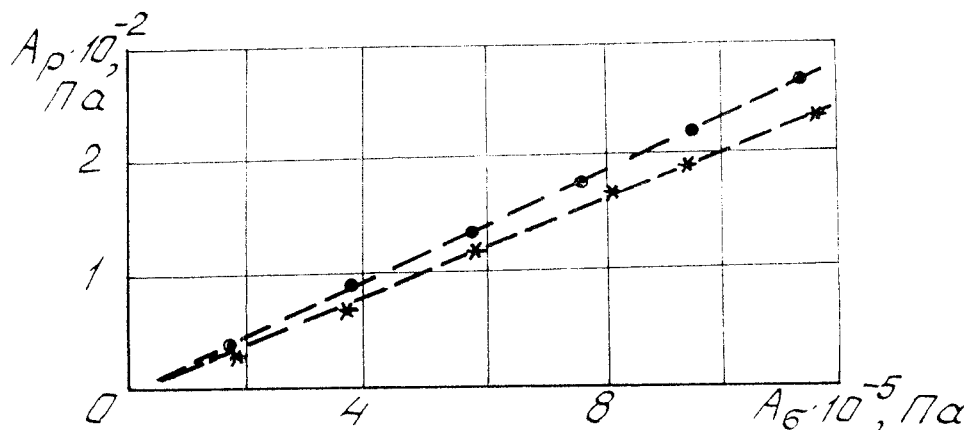
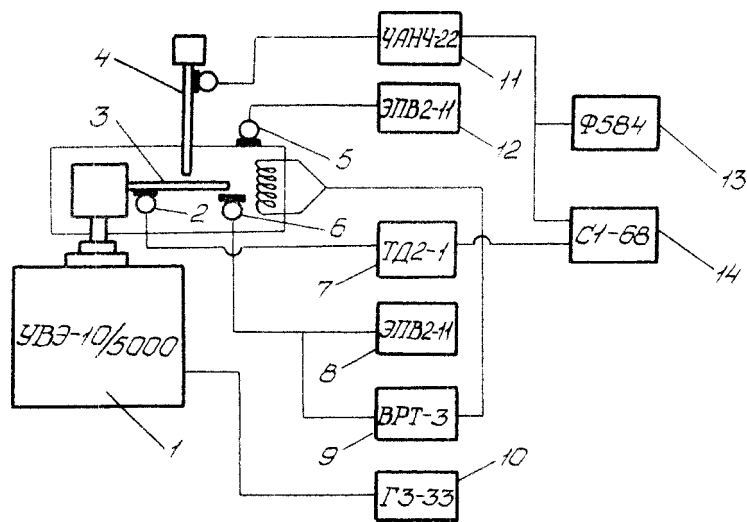
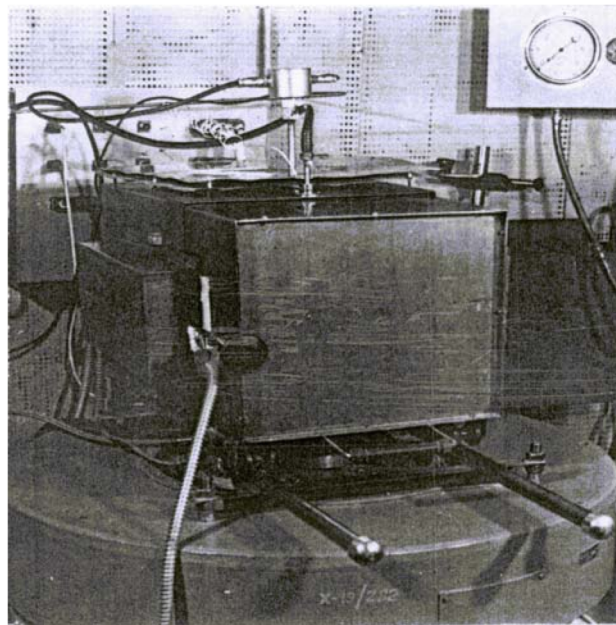


Рис. 3.6.6. Зависимость амплитуды пульсаций давления над испытуемой лопаткой ГТД от амплитуды вибронапряжения у корня лопатки при температуре $1186 \pm 5 \text{ }^\circ\text{K}$ и различных зазорах Н: • - Н = 3 мм; * - Н = 7 мм; ----- - аппроксимация

Исследование устройства для контроля вибронапряжений в лопатке ГТД в условиях повышенных температур проводилось на стенде СКБМ (рис. 3.6.7). Основными узлами стенда являются электродинамический вибратор и электрическая печь. Температура в печи поддерживается на заданном уровне специальным регулятором. Устройство для контроля вибронапряжений устанавливается в электрической печи перпендикулярно корытцу испытуемой лопатки (рис. 3.6.8). Для исключения нагрева датчика пульсаций давления за счет конвективного теплообмена предложено установить над наружной поверхностью печи экран из двух металлических пластин, в пространство между которыми подается воздух. Для выбора параметров волновода и КЭ исследовано распределение температуры по длине измерительной цепи. Из графиков на рис. 3.6.9 следует, что наличие пористого КЭ практически не оказывает влияния на распределение температуры вдоль волновода, а установка теплозащитного экрана существенно снижает температуру его холодного участка.



а



б

Рис. 3.6.7. Принципиальная схема (а) и внешний вид (б) стенда для циклических (длительных) испытаний лопаток ГТД в высокотемпературных условиях: 1 - вибродинамическая установка; 2 - тензометрический датчик напряжения; 3 - испытуемая лопатка; 4 - акустическое устройство для контроля вибронапряжения; 5, 6 - термопара (Хр-Ал); 7 - усилитель; 8, 12 - электрический потенциометр; 9 - регулятор температуры; 10 - генератор переменных напряжений; 11 - усилитель-преобразователь; 13 - вольтметр; 14 - электронный осциллограф

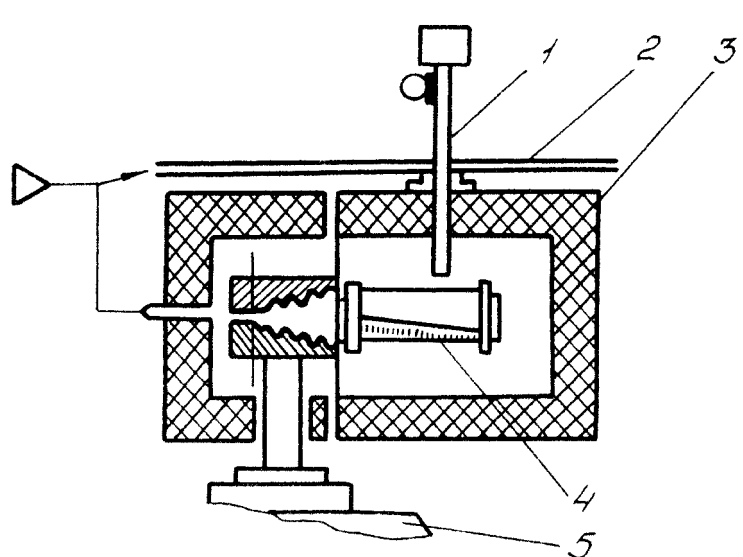


Рис. 3.6.8. Схема установки устройства для контроля вибронапряжения при длительных циклических испытаниях лопаток ГТД при температуре 1200 °К: 1 - устройство для контроля вибронапряжений; 2 - экран охлаждения; 3 - электрическая печь; 4 - испытываемая лопатка; 5 - электродинамический вибратор

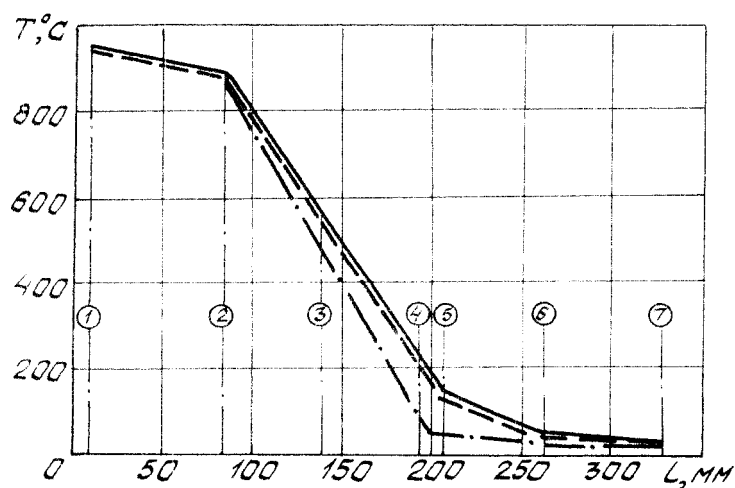


Рис. 3.6.9. Распределение температуры вдоль волноводного канала акустической цепи контроля вибронапряжения в лопатке ГТД:
 ————— - без дросселя коррекции, без экрана охлаждения;
 - - - - - с дросселем коррекции из пористого материала МР, без экрана охлаждения;
 — · — с дросселем коррекции и экраном охлаждения; ① ... ⑦ - координаты установки термопар

Длительные циклические испытания лопаток в условиях высоких температур показали достаточно высокую точность и надежность разработанного акустического зонда контроля вибронапряжения у корня лопатки.

4. ОБРАБОТКА И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКИХ ЗОНДОВ

4.1. Алгоритм обработки и восстановления сигналов

Пульсации давления, измеренные акустическим зондом, отличаются от истинных значений в объекте испытаний на величину динамической погрешности зонда. Эта погрешность может достигать 20...50 % несмотря на применение акустических КЭ, что связано с переменностью режимных параметров двигателя, погрешностью в расчетах. Более точные результаты можно достичь при дополнительной обработке измеренных сигналов с учетом характеристик зонда и режимных параметров объекта испытаний.

Предварительная обработка пульсаций давления, измеренных акустическим зондом в энергетической установке, необходима для корректного восстановления сигнала. Обработка сигнала осуществляется по исходным данным, записанным в файл с магнитографа или непосредственно в память ПЭВМ через быстродействующий АЦП [33,51,52-54]. Предполагается, что данные представлены без предварительного преобразования в давление, т.е. в вольтах или после деления на калибровочный коэффициент датчика с усилителем.

В программе ПОВС1 для исходного сигнала, записанного в файл, используются следующие алгоритмы предварительной обработки: удаление выбросов; устранение тренда, фильтрация (усредняющая, ранговая, частотная).

Удаление выбросов. Для обработки сигнала из записанной в файл реализации $n=0,1,2,3,\dots,N-1$ выбирается участок $i = 0,1,2,3,\dots,I-1$ и для него вычисляется математическое ожидание или среднее значение пульсаций давления m_p

$$m_p = \frac{1}{I} \sum_{i=0}^{i=I-1} p(i) \quad (4.1.1)$$

и дисперсия D_p

$$D_p = \frac{1}{I-1} \sum_{i=0}^{i=I-1} [p(i) - m_p]^2, \quad (4.2.2)$$

где N – максимальное число записанного в файл массива данных.

Дисперсия характеризует рассеивание пульсаций давления около математического ожидания. Среднеквадратическое значение $\sigma_p = \sqrt{D_p}$ также характеризует рассеивание, но имеет размерность пульсаций давления.

Удаление случайных выбросов. В зависимости от формы пульсаций давления задается коэффициент границы удаленности значений параметра $k_{ep} = 2,5 \dots 3,5$. Удаление выбросов в файле данных производится по условию

$$p(i) - m_p \geq k_{ep} \sigma_p. \quad (4.2.3)$$

Если условие (4.2.3) выполняется, то i -ому значению сигнала $p(i)$ присваивается $i-1$ значение сигнала $p(i)=p(i-1)$, иначе значение сигнала $p(i)$ не изменяется.

Устранение тренда. Устранение тренда позволяет выполнить одно из условий спектрального анализа – стационарность сигнала и корректность его дальнейшей обработки. Устранение тренда соответствует такой обработке сигнала, при которой математическое ожидание участков массива данных остается постоянным. Метод устранения тренда принят следующий. Массив данных $p(i)$, $i=0,1,2,\dots,I-1$ разбивается на ряд участков и для каждого из них вычисляется математическое ожидание $m_{py}(j)$, где $j=1,2,3,\dots,J$ – номера участков. Полученная зависимость $m_{py}(j)$ аппроксимируется полиномом второй степени $y = ax^2 + bx + c$, после чего производится коррекция значений сигнала по формуле:

$$p_T(i) = p(i) - (ai^2 + bi + c) + m_p, \quad i = 0, 1, 2, \dots, I - 1.$$

После такого преобразования математическое ожидание будет приблизительно постоянным на всем выбранном интервале наблюдения и равно m_p .

Фильтрация сигнала при помощи усреднения. Если сигнал искажен аддитивным шумом, то целесообразно применять усредняющий фильтр. Алгоритм усредняющего фильтра построен таким образом, что вначале задается размер маски M (нечетное число) и новое значение сигнала в центре маски полагается равным среднему арифметическому значению сигналов, попавших в маску:

$$p_T(i) = \frac{1}{M} \sum_{k=-M/2}^{k=M/2} p_T(i+k), \quad i = M/2, \dots, I-1-M/2.$$

На краях обрабатываемого массива данных можно действовать различными способами: оставить их без изменения; доопределить сигнал ближайшим значением $p_T(0)$ для отрицательных индексов и $p_T(N-1)$ для положительных индексов). Очевидно, что усредняющий фильтр является частным случаем КНХ-фильтра:

$$p_T(i) = \frac{1}{M} \sum_{k=-M/2}^{k=M/2} n_k p_T(i+k), \quad i = M/2, \dots, I-1-M/2.$$

Для того, чтобы фильтр был сглаживающим (подавлял шум и сохранял среднее значение сигнала), необходимо выполнение двух условий:

$$\sum_{k=-M/2}^{k=M/2} n_k = 1; \quad \forall k n_k \geq 0 .$$

Фильтрация сигнала ранговым фильтром применяется при искажении сигнала импульсным шумом, для которого усредняющий фильтр является неэффективным. Параметрами рангового фильтра является размер маски M и ранг r . Алгоритм рангового фильтра построен таким образом, что значения сигнала внутри маски $p_T(i+k), k = -M/2, \dots, M/2$ упорядочиваются по возрастанию, формируя массив $p_T(k), k = 1, 2, \dots, M$. Новое значение сигнала $p_T(i)$ определяется равенством $p_T(i) = p_T(r)$. Относительно обработки крайних значений массива можно поступить так же, как и для усредняющего фильтра. Ранг может быть произвольным целым числом $1 \leq r \leq M$, но лучше использовать значение вблизи $M/2$, так как такой ранг меньше искажает среднее значение и лучше всего подавляет шум, если среднее значение шума равно нулю. Если известно, что среднее значение шума существенно отличается от нуля, то для подавления шума ранг должен быть ближе к 1 при дополнительном шуме и ближе к M при отрицательном.

Фильтрация сигнала частотными фильтрами. В программе ПОВС1 реализованы идеальные фильтры нижних и верхних частот, полосовой фильтр. Идеальные фильтры построены таким образом, что вначале вычисляется спектр исходного сигнала, затем производится обнуление составляющих частот, не попавших в полосу пропускания. Частоты среза ФНЧ, ФВЧ, нижняя и верхняя частоты среза полосового фильтра задаются пользователем. На последнем шаге выполняется обращение спектра в массив отфильтрованных данных $p_\phi(i)$.

В практике часто вместо идеальных фильтров применяются аппроксимирующие фильтры, например Чебышева, Баттерворта, эллиптический и др. Фильтры, построенные на аппроксимации требуют меньше вычислений, кроме того, они могут применяться при обработке сигналов в режиме реального времени. Однако при обработке и представления отфильтрованной реализации в виде файла данных целесообразно применять идеальные фильтры.

Восстановление сигнала по пульсациям давления. Пусть $x(t)$ - измеренные акустическим зондом значения сигнала, которые отличаются от истинных тем, что они искажены из-за тождественно не равной единице характеристике зонда. Восстановление истинных значений сигнала выполняется в частотной области. Для этого вычисляется преобразование Фурье $X(\omega)$ от функции $x(t)$. Далее корректируется спектр по формуле

$$Y(\omega) = \frac{X(\omega)}{A(\omega) \exp(j\varphi(\omega))}, \quad \text{где } A(\omega), \varphi(\omega) \text{ - соответственно амплитудно-}$$

частотная и фазочастотная характеристики акустического зонда, рассчитанные ранее. Восстановленная временной реализации пульсаций давления $y(t)$ находится путем обратного преобразования Фурье от функции $Y(\omega)$.

4.2. Программа ПОВС1 для обработки и восстановления сигнала по пульсациям давления

4.2.1. Общие сведения о программе ПОВС1

Программа ПОВС1 предназначена для обработки и восстановления измеренных акустическим зондом пульсаций давления в проточном тракте энергетической установки [52,53].

Программа ПОВС1 построена на основе пакета программ РУДИП, разработанного на алгоритмическом языке C++ Builder. В программу РУДИП дополнительно включены алгоритмы и программы предварительной обработки сигналов, прямого и обратного преобразования Фурье.

Программный набор ПОВС1 содержит 13 файлов: исполняемый файл ПОВС1.EXE и 12 файлов изображений.

Общий объём программы с изображениями – 7 МБайт, в том числе 2,5 МБайт – исполняемый модуль.

Программа поставляется в архивированном виде: ПОВС1_exe.rar; ПОВС1_pic.rar (700 КБайт).

Для установки программы на компьютере необходимо скопировать архивы в выбранную директорию и распаковать программой WinRAR.exe.

Для работы программы компьютер должен удовлетворять следующим условиям:

- процессор – Pentium;
- наличие операционной системы Windows 98 или выше;
- оперативная память не ниже 32 Мбайт;
- разрешение экрана не ниже 1024x768 точек (обязательное условие!) при 256 или более цветах;
- дискровая память (если упомянутые выше 8 файлов уже размещены на жёстком диске, то дополнительная память не требуется, если только пользователь не будет сохранять результаты в файлах).

4.2.2. Инструкция по пользованию программой ПОВС1

Перед тем как пользоваться программой, следует убедиться в наличии в одной директории исполняемого файла PОВS1.EXE и двенадцати файлов

изображений, указанных в разделе 4.2.1. Запуск программы осуществляется любым из стандартных способов запуска WINDOWS - приложений, например, клавишей ENTER.

После запуска на экране появится форма с изображением компьютера с подключённым к нему осциллографом и рядом переключателей (рис. 4.2.1), при помощи которых пользователь задаёт структуру процесса вычислений и обработки данных.

Признак используемого в акустическом зонде типа датчика давления предполагает возможность применения датчика пульсаций давления и датчика пульсаций перепада давления. Задавая признак подключения корректирующих элементов, можно вести обработку и восстановление сигнала, измеренного акустическим зондом без корректирующего элемента или с корректирующим элементом.

В отличие от программы РУДИП в программе ПОВС1 вычисления всегда ведутся в размерных параметрах.

Снизу от переключателей признаков акустического зонда расположено 5 кнопок: "**Ввод**", "**Счёт**", "**Графики**", "**Таблица**" и "**Выход**". Нажатие кнопки "**Ввод**" вызывает появление последующих экранов, на которых пользователь вводит количественные характеристики подводящего канала, датчика давления и КЭ. По нажатии кнопки "**Счёт**" происходит вычисление значений различных функций, описывающих измерительную систему при выбранных параметрах. Если кнопка "**Ввод**" не нажималась, то расчёты идут при значениях параметров, установленных по умолчанию. Процесс вычислений отражает бегущая строка в левом нижнем углу экрана (рис. 4.2.1). Пока расчёт не произведён, кнопки "**Графики**" и "**Таблица**" находятся в пассивном состоянии и не могут быть нажаты. При нажатии кнопки "**Графики**" появляется окно (рис. 4.2.2), в котором можно посмотреть, напечатать и сохранить в файл графики зависимости характеристик системы от частоты. Аналогично при нажатии кнопки "**Таблица**" пользователь увидит таблицу значений этих же характеристик (рис. 4.2.3), которую можно напечатать или сохранить в виде файла. Нажатие кнопки "**Выход**" приводит к завершению работы программы.

Окно (рис. 4.2.4), в котором производятся действия по корректировке измеренных значений пульсаций давления, открывается при нажатии кнопки «**Режим корректировки**». Так как при корректировке используются амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики акустического зонда, то эта кнопка становится активной только после выполнения их расчёта.

Независимо от расчётов частотных характеристик при нажатии кнопки «**Обработка сигнала**» появляется окно, в котором производятся действия по обработке и анализу измеренного сигнала (рис. 4.2.5, 4.2.6).

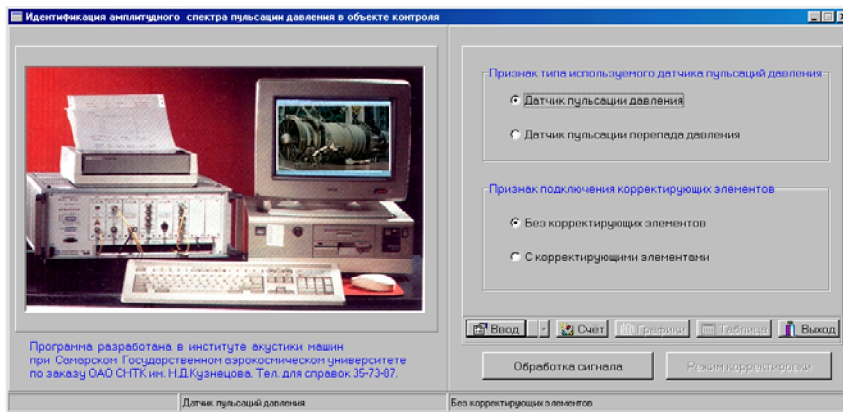


Рис. 4.2.1. Основное окно программы

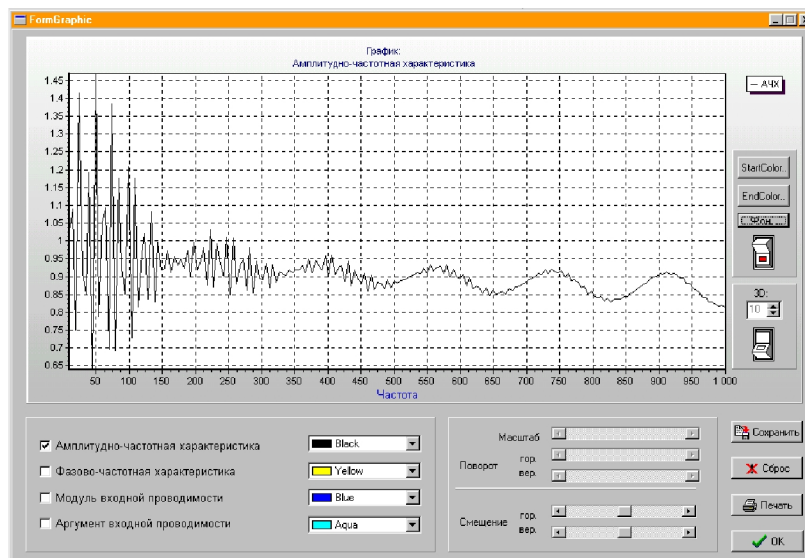


Рис. 4.2.2. Окно вывода результатов вычислений в виде графика

№	Частота	АЧХ	ЛАЧХ	ФЧХ	МВхП	АВхП
1	10	1.0305012	0.26096363	-32.45152	9.75778E-9	-5.1772919
2	14.95	1.089915	0.74785225	-6.8254754	2.0775189E-9	46.571036
3	19.9	0.75102207	-2.4069360	-14.8165	2.554241E-9	-42.057663
4	24.85	1.4141066	3.0096432	-31.813051	5.8120745E-9	25.60561
5	29.8	0.909523	-0.81962743	-15.503719	1.5553538E-9	7.4668424
6	34.75	0.85257842	-1.3953132	-63.410594	4.6369564E-9	-25.663546
7	39.7	1.1915751	1.5224284	-26.145221	2.9718407E-9	32.920621
8	44.65	0.63867064	-3.894461	-47.172975	2.3869764E-9	-25.202469
9	49.6	1.4692224	3.3417507	-55.618052	4.9907489E-9	11.682069
10	54.55	0.78876668	-2.0830808	-39.506355	1.9821682E-9	7.8552798
11	59.5	1.049453	0.41926002	-86.606772	4.0829008E-9	-19.161988
12	64.45	1.091714	0.76217723	-47.650656	3.0652016E-9	23.572104
13	69.4	0.69672049	-3.1398283	-85.864847	2.5418054E-9	18.335187
14	74.35	1.3858003	2.8340133	-73.751479	4.3954357E-9	7.8903588
15	79.3	0.69275653	-3.1883875	-74.022316	2.2228391E-9	5.1325683
16	84.25	1.17546	1.4115432	-103.40767	3.8241364E-9	-14.475855

Рис. 4.2.3. Окно результатов вычислений в виде таблицы

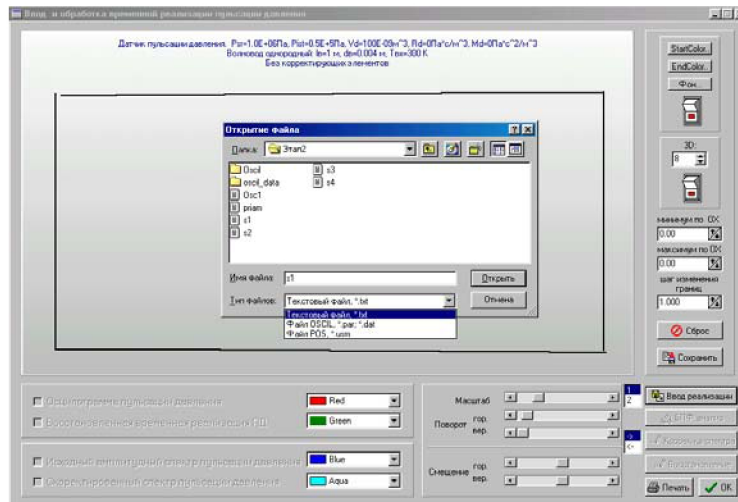


Рис. 4.2.4. Окно обработки временной реализации пульсации давления (окно открытия файла, содержащего исходную реализацию)

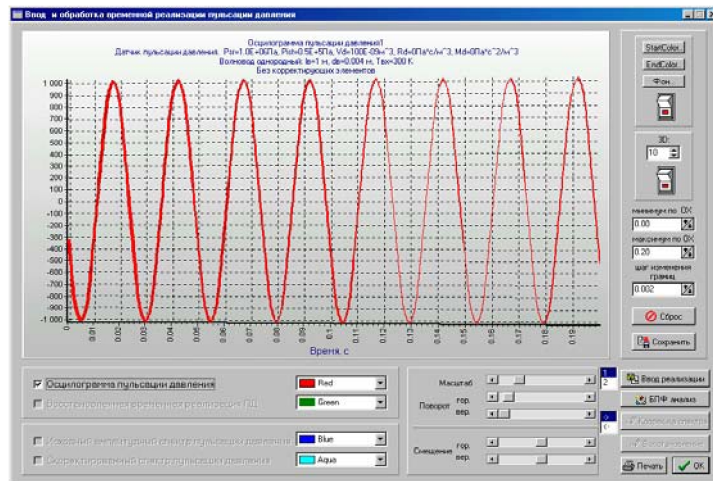


Рис. 4.2.5. Окно обработки временной реализации пульсации давления (график исходной реализации)

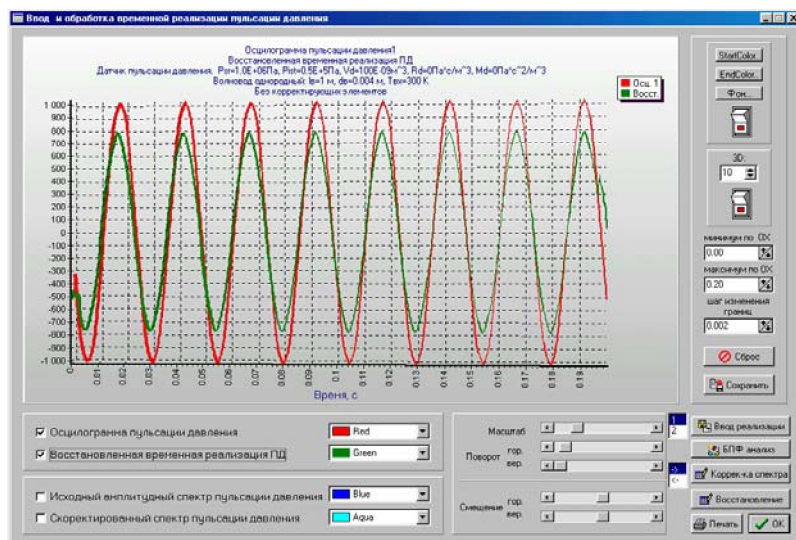


Рис. 4.2.6. Окно обработки временной реализации пульсации давления (графики исходной и восстановленной реализаций)

При вводе и сохранении осциллограмм (реализаций) используются три формата – текстовый файл, формат бинарного файла из программы OSCIL (программы «осциллограф», предназначенной для работы с аналого-цифровыми платами, выпускаемыми фирмой "L-Card") и формат файла УСМЛ, используемый в известном программном пакете РОС (Пакет обработки сигналов). В данной версии программы нет возможности изменения формата: исходная или восстановленная реализация должна сохраняться в том же формате, в котором был исходный файл. При вводе реализации после запроса имени файла у пользователя дополнительно спрашивается номер канала (рис. 4.2.7) в случае ввода из файла формата OSCIL или название параметра в случае ввода из файла формата УСМЛ. Такой запрос необходим, так как в файлах этих форматов может храниться несколько измеренных сигналов.

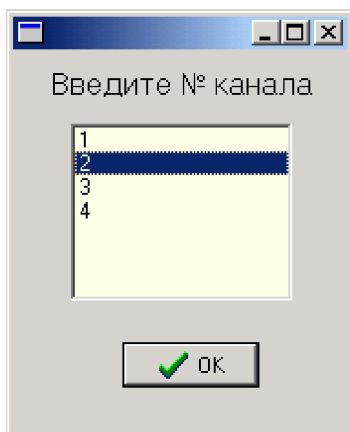


Рис. 4.2.7. Окно выбора канала

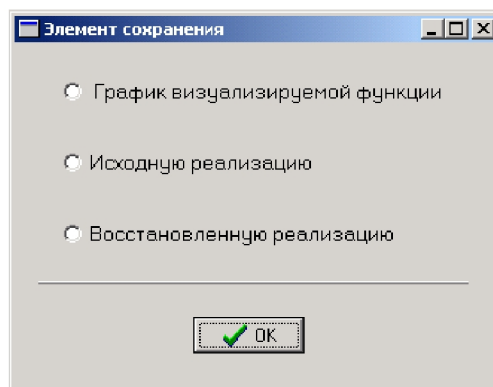


Рис. 4.2.8. Окно сохранения реализаций

При нажатии кнопки «**Сохранить**» перед диалоговым окном сохранения файла появляется запрос (рис. 4.2.8), что именно требуется сохранить в файле (в программе РУДИП мог сохраняться только график).

Во внешнем виде формы есть два объекта: список из элементов **1** и **2** рядом с кнопкой «**Ввод реализации**» и список из элементов \rightarrow и \leftarrow рядом с кнопкой «**Корректировка спектра**». Их назначение следующее. Выбор элемента из первого списка определяет номер вводного буфера. Отметим, что операции по восстановлению сигнала производятся только над данными, хранимыми в первом буфере, а ввод двух сигналов используется только для их визуального сравнения (если указана визуализация осциллограммы пульсации давления, и оба буфера не пусты, то рисуется два графика). Стрелки из второго списка определяют, как именно производится корректировка спектра. При выборе \rightarrow корректировка происходит стандартным путём. Выбор \leftarrow задаёт обратный процесс – спектр сигнала умножается на частотную характеристику: $Y(\omega) = X(\omega)A(\omega)\exp(i\varphi(\omega))$. Необходимость в таких действиях возникает только при моделировании и

тестировании, так как здесь предполагается, что известны истинные значения сигнала.

Теперь подробнее опишем окно, появляющееся при нажатии кнопки «**Обработка сигнала**» (см. рис. 4.2.4). Ввод осуществляется в один из двух буферов, но аналогично окну корректировки сигнал из второго буфера не обрабатывается, а лишь виден на графике. Внешний вид поля параметров фильтра меняется при выборе типа фильтра. Рядом расположена таблица статистических характеристик сигнала, заполняемая при нажатии кнопки «**Статистика**». Во многих случаях используется не один фильтр, а последовательно несколько фильтров. Для обеспечения таких цепочек (на вход следующего фильтра подаётся выход предыдущего, а не исходный сигнал), фильтрация реализована не одной кнопкой, а тремя. Первой пользователь нажимает кнопку «**Начать фильтрацию**». Далее задаются параметры очередного фильтра (параметры первого фильтра можно задать ранее) и нажимается кнопка «**Выполнить фильтрацию**», результат отображается на графике. Когда все действия по фильтрации завершены, следует нажать кнопку «**Завершить фильтрацию**», при этом результат фиксируется в буфере и может быть сохранён в файле (кнопка «**Сохранить**» становится доступной). Пример фильтрации приведён на рис. 4.2.9, 4.2.10.

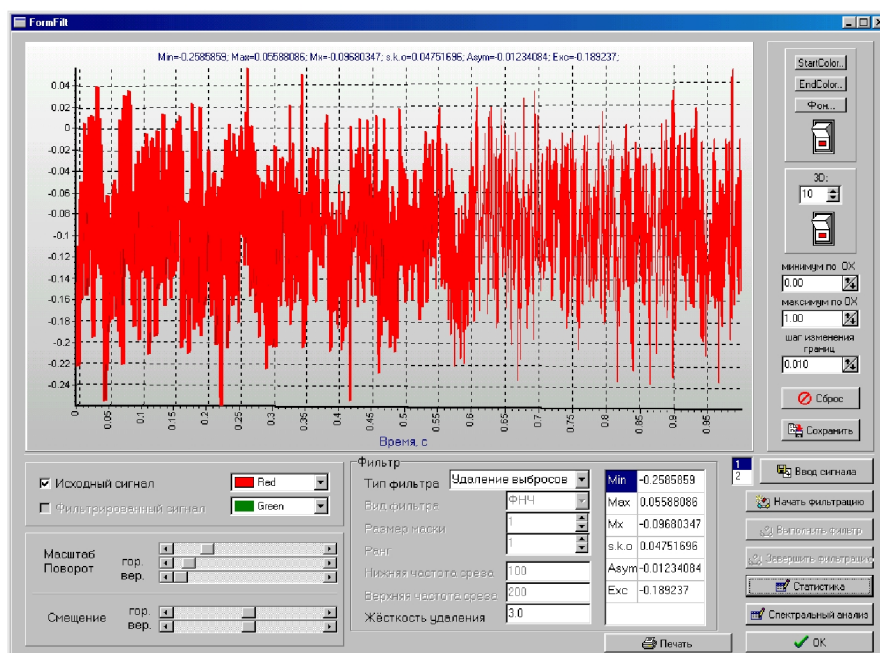


Рис. 4.2.9. Окно предварительной обработки временной реализации пульсации давления (график исходного сигнала)

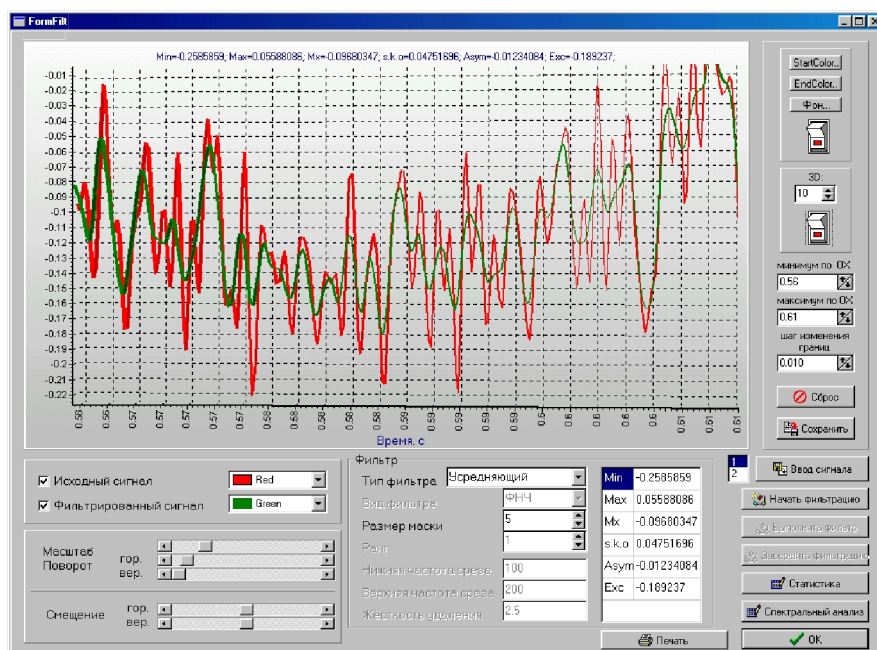


Рис. 4.2.10. Окно предварительной обработки временной реализации пульсации давления (результат применения удаления выбросов и усредняющего фильтра)

Действия, происходящие после нажатия кнопки «Спектральный анализ», описаны ниже.

После нажатия кнопки «Спектральный анализ» появляется новое окно (рис. 4.2.11). В нём пользователь производит вычисление различных спектральных характеристик анализируемого сигнала. На графике показывается весь фрагмент сигнала, вырезанный на графике в родительской форме, в данном окне изменить обрабатываемый фрагмент нельзя.

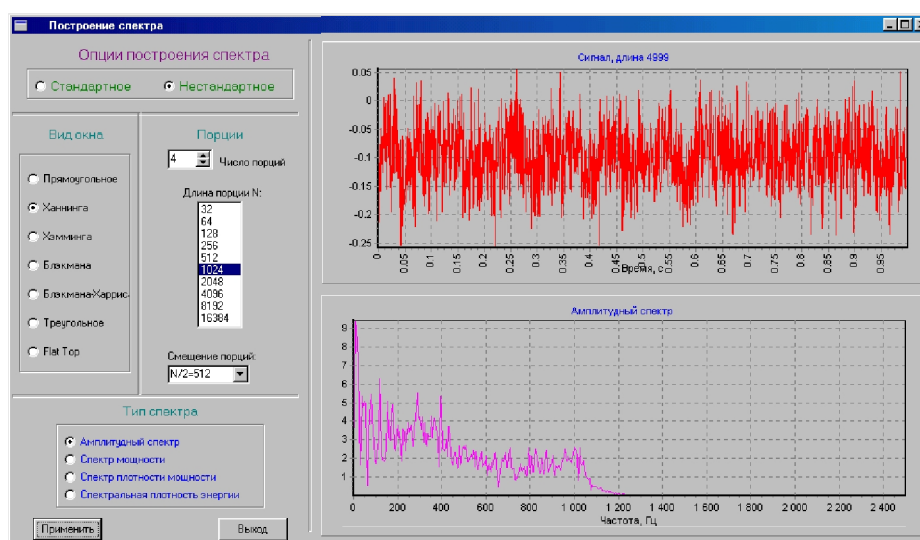


Рис. 4.2.11. Окно спектрального анализа временной реализации пульсации давления

В левой части экрана задаются различные опции спектрального анализа, значение которых соответствует программному пакету ПОС. В отличие от ПОС стандартное построение спектра предполагает, что используется прямоугольное окно, одна порция, длина которой равна всей длине фрагмента (в ПОС такой возможности нет). Второе отличие связано с тем, что если при нестандартном построении задана одна порция, то её длина тоже равна всей длине фрагмента.

Таким образом, для корректировки записанного в память ПЭВМ сигнала необходимо выполнить следующие операции:

1. Вызов программы ПОВС1 на экран монитора ПЭВМ.
2. Ввод исходных данных по режимным и конструктивным параметрам акустического зонда.
3. Расчет частотных характеристик акустического зонда (выполняется в соответствии с методикой, изложенной в параграфе 2.4).
4. Активизация режима корректировки в основном окне программы ПОВС1: в процедуре "Корректировка" производится загрузка в буфер сигнала, зарегистрированного датчиком зонда (файл OSCIL - 14 канал).
5. Из визуализированной в окне временной реализации сигнала нужно выбрать участок с несколькими периодами (10...15) по основной гармонике.
6. Для выбранного участка производится частотный (БПФ) анализ сигнала.
7. Производится корректировка частотных характеристик зонда по рассчитанным его частотным характеристикам.
8. По скорректированной частотной характеристике зонда производится восстановление сигнала, то есть находится временная реализация пульсаций давления в объекте контроля.

Использование зондов без акустических корректирующих элементов не гарантирует приемлемой точности восстановления сигнала из-за резкого возрастания уровня шумов в полосах акустического усиления сигнала и невысокой точности расчета частотных характеристик зондов в полосах частот, соответствующих резонансным пикам.

Для проверки правильности операции корректировки производится тестирование программного комплекса. Оно состоит в выполнении следующих операций.

1. Войти в форму корректировки сигнала, нажав кнопку «Режим корректировки» на первом экране программы.
2. Нажать кнопку «Ввод реализации» при отмеченном элементе 1 рядом с ней и загрузить некоторый тестовый сигнал. Для наглядности его можно взять в виде суммы нескольких синусоид. Пусть для определённости он хранится в файле TEST в тестовом виде или в формате УСМЛ (использовать формат OSCIL для теста хуже, так как при этом на результат восстановления будет влиять округление чисел).

3. Нажать кнопку «БПФ анализ».
4. Нажать кнопку «Корректировка спектра» при выбранном элементе →.
5. Нажать кнопку «Восстановление».
6. Нажать кнопку «Сохранить» и выбрать из перечня восстановленную реализацию. Очень важно перед сохранением не делать ничего с графиком. Результат сохраняется в файле TEST1.
7. Нажать кнопку «Ввод реализации» при отмеченном элементе 1 рядом с ней и загрузить преобразованный сигнал из файла TEST1.
8. Нажать кнопку «БПФ анализ».
9. Нажать кнопку «Корректировка спектра» при выбранном элементе ←. Именно в направлении корректировки отличие от шага 4.
10. Нажать кнопку «Восстановление».
11. Нажать кнопку «Сохранить» и выбрать из перечня восстановленную реализацию. Так же как и на шаге 8 не нужно выполнять никаких операций. Результат сохраняется в файле TEST2.
12. Нажать кнопку «Ввод реализации» при отмеченном элементе 1 рядом с ней и загрузить исходный сигнал из файла TEST.
13. Нажать кнопку «Ввод реализации» при отмеченном элементе 2 рядом с ней и загрузить дважды преобразованный сигнал из файла TEST2
14. Поставить птичку в поле осциллограмма пульсации давления. Появится два графика, которые по смыслу прямой и обратной коррекции должны быть одинаковы. Наблюдать их совпадение лучше при отключенной объёмной графике, нажав переключатель 3D в правом верхнем углу экрана.

Список литературы

1. А.с. 241764 СССР, Кл. *G01L 42*. Аэрометрический приемник для измерения нестационарных давлений в газовом потоке / В.В. Богданов (СССР). - №1201909 / 26-10; Заявл. 08.12.67; Оpubл. 18.04.69, Бюл. №14.
2. А.с. 301619 СССР, Кл. *G01p 5/16*. Аэрометрический приемник / Я.П. Каплун, М.П. Вашкевич (СССР). - №142276; Заявл. 03.04.70; Оpubл. 21.04.71, Бюл. №14.
3. А.с. 427252 СССР, *G01L 7 / 00*. Устройство для измерения пульсаций давления газа / В.В. Богданов (СССР). - №1732339/18-10; Заявл. 03.01.72; Оpubл. 05.05.74, Бюл. №17.
4. А.с. 475524 СССР, М. Кл. *G 01 L 19 / 00, G 01 L 23 / 00*. Устройство для измерения нестационарных давлений в гидросистемах / А.Г. Гимадиев, Л.И. Брудков (СССР). - №1926187/18-10; Заявл. 06.06.73; Оpubл. 30.05.75, Бюл.
5. А.с. 542110 СССР, Кл. *G 01 L 19 / 00*. Устройство для измерения нестационарного давления газового потока / Ю.Ф. Кашкин, О.А. Андрианкин, Н.В. Горшков, Н.Н. Игнатъев (СССР). - №2046818/10; Заявл. 16.07.74; Оpubл. 05.01.77, Бюл. №1.
6. А.с. 731332 СССР, М.Кл.² *G 01 L 27/00*. Устройство для динамической тарировки пневматических датчиков давления / В.П. Шорин, Н.Д. Быстров, А.Г. Гимадиев и др. - №2672372/18-10; Заявл. 27.09.78; Оpubл. 30.04.80, Бюл. №16.
7. А.с. 800735 СССР, М. Кл.³ *G 01 L 7/00, G 01 L 23/00*. Устройство для измерения пульсаций давления газа / В.П. Шорин, Н.Д. Быстров, А.Г. Гимадиев и др. - №2733808/18-10; Заявл. 06.03.79; Оpubл. 30.01.81, Бюл. №4.
8. А.с. 862003 СССР, М. Кл.³ *G 01 L 19/00, G 01 L 19/06*. Устройство для измерения пульсаций давления / В.П. Шорин, Н.Д. Быстров, А.Г. Гимадиев и др. (СССР). - №2871239/18-10; Заявл. 18.01.80; Оpubл. 07.09.81, Бюл. №33.
9. А.с. 924529 СССР, М. Кл.³ *G 01 L 7/00*. Устройство для измерения пульсаций давления газа / В.П. Шорин, Н.Д. Быстров, А.Г. Гимадиев и др. (СССР). - №2948564/18-10; Заявл. 01.07.80; Оpubл. 30.04.82; Бюл. №16.
10. А.с. 1295217 СССР, Кл. *G 01 B 13/12*. Пневматическое устройство для контроля виброперемещения / В.П. Шорин, А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров и др. (СССР). - №3975630/25-28; Заявл. 29.10.85; Оpubл. 07.03.87, Бюл. №9.
11. А.с. 1539552 СССР, Кл. *G 01 L 19/00*. Устройство для измерения пульсаций давления газа / В.П. Шорин, А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров и др. (СССР). - №4408171/24-10; Заявл. 11.04.88, Оpubл. 30.01.90, Бюл. №4.
12. Андрианкин, О.А. Средства измерения пульсирующего давления в канале воздухозаборника самолета в стендовых условиях // Вопросы аэродинамики летательных аппаратов: Межвуз. сб. научн. тр. – М: Моск. авиац. ин-т, 1975. - Вып. №323. - С. 81 - 88.
13. Арсенин, В.Я. Восстановление формы сигнала, свободной от искажений, обусловленных аппаратурой и каналом передачи / В.Я. Арсенин, В.В. Иванов // Измерительная техника. - 1969. - №1. - С. 74-79.
14. Белоусов, А.И. Исследование гидравлических характеристик пористого материала МР / А.И. Белоусов, Е.А. Изжеуров, А.Д. Сетин // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб. науч. тр. - Куйбышев: КуАИ, 1975. - Вып. №2/7. - С. 70-79.
15. Бойков, Н.А. Измерение давлений при быстропротекающих процессах / Н.А. Бойков, П.С. Звездин, Л.Б. Резник. - М.: Энергия, 1970. – 62 с.
16. Бузицкий, В.Н. Цельнометаллические упругодемпфирующие элементы, их изготовление и применение / В.Н. Бузицкий, А.М. Сойфер // Вибрационная прочность

- и надежность авиационных двигателей: Сб. науч. тр. – Куйбышев: КуАИ, 1965. - Вып. №19. - С. 259 - 266.
17. Быстров, Н.Д. Об одной схеме выравнивания амплитудно-частотных характеристик акустических каналов систем измерения давления / Н.Д. Быстров, А.Г. Гимадиев, В.П. Шорин // Изв. вузов. Авиационная техника. - 1981. - №3. - С. 22 - 26.
 18. Быстров, Н.Д. Коррекция частотных характеристик газовых волноводов систем контроля и управления / Н.Д. Быстров, А.Г. Гимадиев // Пневматика и гидравлика: Приводы и системы управления. - М.: Машиностроение, 1984. - Вып. №10. - С. 101 - 109.
 19. Быстров, Н.Д. Расчет акустического RL - фильтра нижних частот для дифференциальных преобразователей пульсации давления / Н.Д. Быстров, А.Г. Гимадиев // Измерительная техника.-1982. - №2. - С. 41 - 43.
 20. Вейер, Х. Разработка и испытание различных экспериментальных методов измерения пульсирующего давления в турбомашинах / Х. Вейер, Р Шодль. - Труды ASME, серия Д, 1971. - №4. – С. 131-138.
 21. Вакулич, Е.А. Обеспечение достоверности определения давления газа в камерах при динамических измерениях / Е.А. Вакулич, С.В. Гамов, А.Е. Жуковский // Динамические измерения: Тез. докл. У Всесоюзного симпозиума, 15-17 ноября 1988, Ленинград. - Л., 1988. - С. 126 - 129.
 22. Вашны, Е.М. Динамика измерительных цепей / Е.М. Вашны. - М.: Энергия, 1969. - 288 с.
 23. Вильнер, П.Д. Виброскорость как критерий вибрационной напряженности упругих систем / П.Д. Вильнер // Проблемы прочности. - 1970. - №9. - С. 42 - 45.
 24. Влияние пульсаций потока в самолетных воздухозаборниках на работу компрессора ТРД / [В.В. Богданов, А.Г. Кукинов, А.К. Хвостова и др.] // Обзор ЦАГИ № 400. - М.: Изд. отд. ЦАГИ, 1973. – 166 с.
 25. Вялков, А.В. Обзор методов и средств измерения давления / А.В. Вялков, Е.В. Зименков // Труды ЦИАМ. - 1988. - №1258. - С. 25-30.
 26. Гимадиев, А.Г. Об определении характеристик корректирующих устройств, обеспечивающих устойчивость гидромеханических цепей систем управления / А.Г. Гимадиев, Е.В. Шахматов // Динамические процессы в силовых и энергетических установках летательных аппаратов: Сб. научн. тр. – Куйбышев: КуАИ, 1985. - С. 10 - 21.
 27. Гимадиев, А. Г. Расчет акустического зонда для измерения пульсаций давления в малогабаритных энергетических установках / А.Г. Гимадиев // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб. научн. тр. - Куйбышев: КуАИ, 1986. - С. 27-32.
 28. Гимадиев, А.Г. Акустический метод контроля виброперемещений пера лопатки ГТД при высоких температурах / А.Г. Гимадиев, Е.В. Шахматов // Сб. научн. тр. "Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем ЛА". - Куйбышев: КуАИ, 1987. - С. 39-46.
 29. Гимадиев, А.Г. Частотная коррекция акустического зонда для измерений пульсаций давления в воздушно-газовом тракте турбомашин / А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров, В.П. Шорин // Метрология. - 1987. - №2. - С. 43 - 49.
 30. Гимадиев, А.Г. Управление динамическим качеством пневмогидравлических цепей систем автоматического регулирования / А.Г. Гимадиев, Е.В. Шахматов // Тез. докл. "XI Всес. совещ. по проблемам управления". - Ташкент, 1989. - С. 227-228.

31. Гимадиев, А.Г. Коррекция частотной характеристики волноводной цепи струйно-акустического датчика температуры газа / А.Г. Гимадиев, А.Ю. Козлов, В.А. Ишал // Динамические процессы в силовых и энергетических установках летательных аппаратов: Сб. научн. тр. - Куйбышев: КуАИ, 1990. - С. 78-86.
32. Гимадиев, А.Г. Об измерении пульсаций давления в проточной части ГТД / А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров, С.А. Ильинский // Сборн. докл. межд. научн.- техн. конф. "Проблемы и перспективы развития двигателестроения", Ч. 1. – Самара: СГАУ, 2006. - С. 171-172.
33. Гимадиев, А.Г. Повышение точности измерения пульсаций давления в проточной части ГТД цифровой коррекцией частотных характеристик акустического зонда / А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров, С.А. Ильинский // Динамика машин и рабочих процессов: Сборник докладов Всероссийской НТК.- Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – С. 56.
34. Гликман, Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем / Б.Ф. Гликман. - М.: Наука, 1986. - 368 с.
35. Джексон, Р.Г. Новейшие датчики / Р.Г. Джексон. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
36. Залманзон, Л.А. Аэрогидродинамические методы измерения входных параметров автоматических систем / Л.А. Залманзон. - М.: Наука, 1973. - 464 с.
37. Затолока, В.В. Об измерении быстроменяющихся давлений с применением пневмотрасс / В.В. Затолока, В.И. Звягинцев // Аэрофизические исследования. - Новосибирск, 1975. - Вып. №5. - С. 309 - 312.
38. Зилке, В. Трение, зависящее от частоты, при неустановившемся течении в трубопроводе / В. Зилке // Теоретические основы инженерных расчетов. - 1968. - №1. - С. 120 - 127.
39. Ибрагимов, И.А. Элементы и системы пневмоавтоматики / И.А. Ибрагимов, Н.Г. Фарзанае, Л.В. Илясов. – М.: Высшая школа, 1975. – 350 с.
40. Васильев, В.И. Исследование интенсивности турбулентных пульсаций потока в воздухозаборниках / В.И. Васильев, Н.А. Юденков, В.В. Богданов // Труды ЦАГИ, Вып. №1327. – М.: Изд. Отд. ЦАГИ, 1971. – С. 3-19.
41. Караджи, В.Г. Измерение амплитудно-частотных характеристик приемников давления в акустическом поле сверхзвуковой струи / В.Г. Караджи, Л.В. Голубкова // Тр. ЦИАМ. - 1987. - №1232. - С. 148 - 156.
42. Карам мл., Ж.Т. Частотные характеристики пневматических линий передач / Ж.Т. Карам мл., М.Е. Франк // Теоретические основы инженерных расчетов. - 1967. - №2. - С. 149 - 155.
43. Коган, И.Ш. Конструирование и наладка пневмоакустических измерительных устройств / И.Ш. Коган, С.Г. Сажин. - М.: Машиностроение, 1980. - 124 с.
44. Козобков, А.А. О влиянии подводящей трубки на показания контрольно-измерительных приборов давления при пульсирующих потоках газа / А.А. Козобков, И.В. Князев / Газовое дело: Научно-техн. сб. - М., 1968. - №12. - С. 33 - 35.
45. Кривоносов, И.И. Экспериментально-расчетные методы определения статических и динамических характеристик датчиков и каналов измерения давления ИИС / И.И. Кривоносов, И.В. Игнатъев // Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвуз. сб. научн. тр. - Пенза, 1984. - Вып. №4. - С. 34 - 38.
46. Кукинов, А. Г. Одномерные колебания потока в цилиндрической трубе / А.Г. Кукинов // Тр. ЦАГИ. - 1970. - Вып. №1231. - С. 3 - 33.
47. Лепендин, Л.Ф. Акустика: Учеб. пособие для вузов / Л.Ф. Лепендин. - М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.

48. Летные испытания специальных устройств и систем силовых установок самолетов и вертолетов / [Г.П. Долголенко, В.Т. Дедеш, А.П. Леут и др.]; Под общей ред. Г.П. Долголенко. – М.: Машиностроение, 1984. – 128 с.
49. Лисочкин, Я.А. Учет влияния подводящих каналов к измерителям давления при наличии градиента температур / Я.А. Лисочкин // Измерительная техника. - 1966. - №1. - С. 51 - 53.
50. Максимов, В.П. Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах / В.П. Максимов, И.В. Егоров, В.А. Карасев. - М.: Машиностроение, 1987. - 208 с.
51. Мелешко, Ю.П. Определение динамических характеристик пневматических измерительных линий / Ю.П. Мелешко, В.И. Наливаев, В.В. Переверзнецов // Современные проблемы гидродинамики и теплообмена в элементах энергетических установок и криогенной техники: Межвуз. сб. научн. тр / Всесоюз. заоч. машиностроит. ин-т. - М, 1987. - С. 102 - 105.
52. Методика восстановления сигнала, измеренного акустическими зондами при испытании авиационных ГТД / [А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров, С.А. Ильинский и др.] // Сборн. докл. межд. научн.- техн. конф., посв. памяти генер. констр. аэрокосм. техн. академика Н. Д. Кузнецова, 21-22 июня 2001 г. Ч. 1. – Самара: СГАУ, 2001. – С. 164-172.
53. О восстановлении временных реализаций пульсаций давления, искаженных акустическими зондами при измерении параметров авиационных двигателей / [А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров, С.А. Ильинский и др.] // Тезисы докладов Междунар. научно-техн. конф., посвященной памяти генерального конструктора аэрокосмической техники академика Н.Д. Кузнецова, 21-22 июня 2001 г. Ч. 1. – Самара: СГАУ, 2001. – С. 91-92.
54. О методе экспериментального определения частотных характеристик пневматических цепей и компьютерной программе для его реализации / [А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров, С.А. Ильинский и др.] // Сборн. тезисов докл. межд. научн.- техн. конф. "Проблемы и перспективы развития двигателестроения". Ч. 2. – Самара: СГАУ, 2003. – С. 51-52.
55. Пакет программ для расчета частотных характеристик акустических зондов для измерения пульсаций давления в экстремальных условиях эксплуатации / [А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров, С.М. Игначков и др.] // Научно-техн. сб. РК Техника. Серия Х11, выпуск №1. Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем. – Самара: ВКБ «Энергия», 2000. – С. 170-180.
56. Петунин, А.Н. Измерение параметров газового потока / А.Н. Петунин. - М.: Машиностроение, 1974. - 260 с.
57. Плотников, И.В. Состояние и задачи метрологического обеспечения измерения переменных давлений / И.В. Плотников, Г.И. Полухин, В.П. Шумилин // Метрология. - 1976. - №4. - С. 19 - 25.
58. Попов, Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем / Д.Н. Попов. - М.: Машиностроение, 1987. - 464 с.
59. Сенин, В.С. Определение динамических характеристик присоединительных каналов преобразователей при измерении колебаний давления / В.С. Сенин // Измерительная техника. - 1967. - №10. - С. 27 - 29.
60. Тийдеман, Х. Замечание о частотных характеристиках пневматических линий / Х. Тийдеман // Труды ASME. Сер. Д, Т. 91. - №2. - 1969. - С. 220 - 222.
61. Федоров, А.В. Динамические характеристики элементов канала измерения перепада

- давления сужающих устройств / А.В. Федоров, Г.И. Якушева // Измерительная техника. - 1988. - №10. - С. 28 - 30.
62. Федяков, Е.М. Измерение переменных давлений / Е.М. Федяков, В.К. Колтаков, Е.Е. Богдатов. - М.: Изд-во стандартов, 1982. - 216 с.
63. Чарный, И.А. Неустановившееся течение реальной жидкости в трубах / И.А. Чарный. - М.: Недра, 1975. - 223 с.
64. Шорин, В.П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах / В.П. Шорин. - М.: Машиностроение, 1980. - 156 с.
65. Шорин, В.П. Проблемы передачи информации в пневмогидравлических цепях / В.П. Шорин, А.Г. Гимадиев // Тезисы докл. Всесоюзной конф. «Пневмогидроавтоматика – 99», 23-24 ноября 1999. – М.: ИПУ, 1999. – С. 187-188.
66. Шорин, В.П. Бесконтактный способ контроля напряжений в пере лопатки ГТД при вибрационных испытаниях / В.П. Шорин, А.Г. Гимадиев, Е.В. Шахматов // Авиационная промышленность. – 1988. - №8. - С. 68-72.
67. Шорин, В.П. Гидравлические и газовые цепи передачи информации / В.П. Шорин, А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров. – М.: Машиностроение, 2000.- 384 с.
68. Шумилин, В.П. Погрешности измерения переменного давления / В.П. Шумилин // Метрология. - 1982. - №3. - С. 20-25.
69. Экспериментальное исследование частотных характеристик пневматических цепей систем измерения пульсаций давления / [А.Г. Гимадиев, В.С. Гурнак, Л.В. Голубкова и др.] // Динамические процессы в силовых и энергетических установках летательных аппаратов: Межвузовский сборник научн. тр. - Самара: СГАУ, 1994. - С. 196-201.
70. Samson, T.E. Dynamic characteristics of Pneumatic Transmission / T.E. Samson // Trans. of the Society of Instrument Technology. Vol. №10. - 1958. -P. 117-134.
71. Talacko, J. Ausnutzungsmöglichkeiten von akustischen Signalen in Flüssigkeitsmechanismen / J. Talacko // 2. Fachtagung Hydraulik und Pneumatik. Vorträge. -DDR, Magdeburg, 1977. -Teil №1. - S. 93-103.

*Шорин Владимир Павлович
Шахматов Евгений Владимирович
Гимадиев Асгат Гатьятович
Быстров Николай Дмитриевич*

**АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ**

Учебное пособие

Редакторская обработкаЮ.Н. Литвинова
Верстка

Подписано в печать 6.02.08 . Формат 60x84x1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 8,25
Тираж 200 экз. Заказ

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.