

мендации по технологическому процессу упрочнения деталей из алюминиевых сплавов в условиях производства и ремонта воздушных судов.

УДК 532.542

А.Г.Гимадиев, В.С.Гурнак, Л.В.Голубкова,
В.А.Дудкин, Г.И.Берестнев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

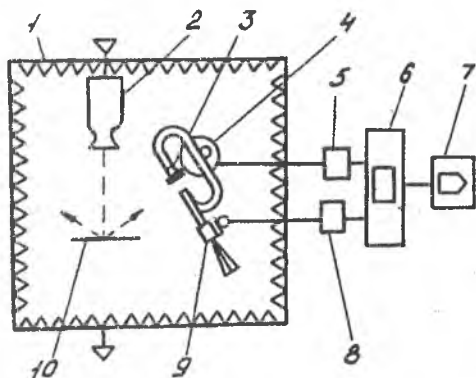
Описано экспериментальное оборудование и измерительно-регистрационный комплекс для частотных испытаний пневматических измерительных цепей при температуре окружающей среды и в высокотемпературных условиях (до 850 ± 20) К. Приведены результаты испытаний измерительных устройств с капиллярными корректирующими элементами (КЭ), подтверждающие ранее полученные теоретические зависимости и показывающие достаточно высокую эффективность разработанных КЭ при измерении пульсаций давления в диапазоне частот до 10 кГц.

Одним из важных параметров, по которому осуществляется доводка авиационного ГТД, является динамическое давление в проточной его части. Измерение пульсаций давления в условиях повышенных температур, высоких уровней вибраций, ограниченности пространства под установку датчиков производится при помощи специальных измерительных устройств (ИУ), состоящих из волноводного канала, датчика пульсаций давления и корректирующего элемента (КЭ). Последний предназначен для акустического согласования подводящего канала и датчика давления в широком диапазоне частот. Достаточно малые габариты ИУ реализуются при использовании КЭ в виде набора (пучка) капиллярных каналов, методика выбора параметров и результаты теоретических исследований эффективности которых приведены в [1].

Динамические процессы в установках ИА. Самара, 1994.

В данной статье описано разработанное авторами стендовое оборудование, собранный измерительный комплекс и представлены результаты экспериментальных исследований ИУ с капиллярными КЭ при температуре окружающей среды и в условиях высоких температур рабочей среды в объекте контроля.

Частотные испытания ИУ при температуре окружающей среды проводились в заглушенной камере Московского филиала ЦАГИ в диапазоне частот до 25 кГц и на высокотемпературной установке пульсирующих давлений в Самарском аэрокосмическом университете в диапазоне частот до 1500 Гц. Испытания в заглушенной камере проводились в акустическом поле сверхзвуковой струи с преградой (рис. 1) [2]. При этом необходимо было обеспечить условия, при которых источник звука близок к точечному, что позволяет учесть влияние на результаты измерения дифракционных поправок. Исследование направленности акустического поля вблизи рабочей точки показало, что во всем исследованном диапазоне частот источник звука сосредоточен практически в узкой области взаимодействия с преградой. Оптимальным расположением контрольного датчика пульсаций давления и ИУ является такое, при котором они обращены входами (чувствительными элементами) друг к другу, причем их осевые линии перпендикулярны оси отраженной струи. Отклонение входа ИУ относительно контрольного датчика на ± 5 мм не оказывает влияния на точность определения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ИУ, так как размеры рабочей зоны источника колебаний достаточно велики (радиус сферы рабочей зоны не менее 30 мм).



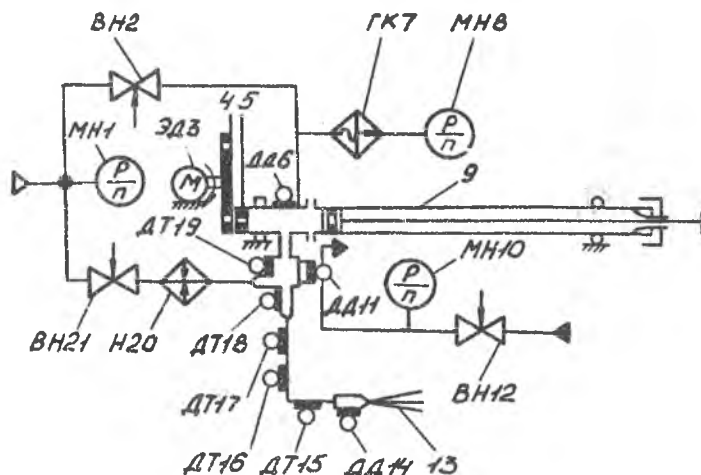
Р и с. 1. Схема проведения частотных испытаний устройства для измерения пульсаций давления газа: 1 - заглушенная камера; 2 - сопловой насадок; 3 - контрольный датчик пульсаций давления (микрофон 4135 фирмы Брьюль и Кьер); 4 - подставка; 5 - усилитель напряжения 2619 (для датчика 4135); 6 - двухканальный анализатор 2031 фирмы Брьюль и Кьер; 7 - регистратор; 8 - усилитель напряжения 2619 (для датчика ДД6-002Т) или 4422 с блоком питания (для датчика 8506-5); 9 - испытываемое устройство на базе датчиков ДД6-002Т или 8506-5

звук к точечному, что позволяет учесть влияние на результаты измерения дифракционных поправок. Исследование направленности акустического поля вблизи рабочей точки показало, что во всем исследованном диапазоне частот источник звука сосредоточен практически в узкой области взаимодействия с преградой. Оптимальным расположением контрольного датчика пульсаций давления и ИУ является такое, при котором они обращены входами (чувствительными элементами) друг к другу, причем их осевые линии перпендикулярны оси отраженной струи. Отклонение входа ИУ относительно контрольного датчика на ± 5 мм не оказывает влияния на точность определения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ИУ, так как размеры рабочей зоны источника колебаний достаточно велики (радиус сферы рабочей зоны не менее 30 мм).

При проведении испытаний ИУ в качестве контрольного датчика пульсаций давления использовался микрофон типа 4135 фирмы Брюль и Кьер (см. рис. 1). В ИУ применялся пьезоэлектрический датчик пульсаций давления ДДБ-002Т, работающий в комплекте с измерительной аппаратурой ПАД-6 разработки ЛИИ. В комплект ПАД-6 входят истоковые повторители ПИ-2, двухканальное согласующее устройство ЗСУ-6 и блок источника питания БИП-002 (см. рис. 1). Электрический сигнал с выхода датчика поступает на истоковый повторитель, с выхода которого подается на вход ЗСУ-6, в котором происходит усиление сигнала. Исследование амплитудных и амплитудно-частотных характеристик ПАД-6 совместно с датчиками показало, что при температуре окружающей среды $\pm 45^{\circ}\text{C}$ предельная погрешность аппаратуры не превышает допустимой величины $\pm 5,2\%$.

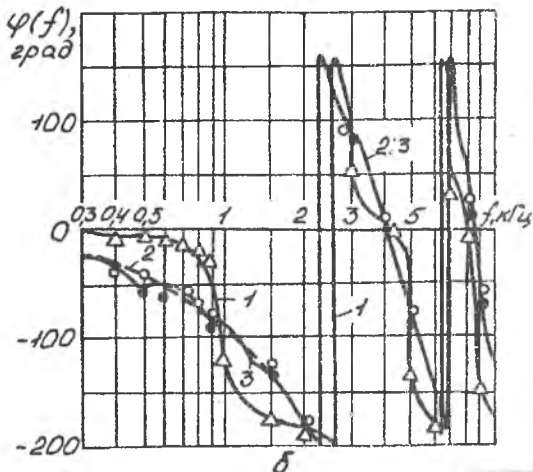
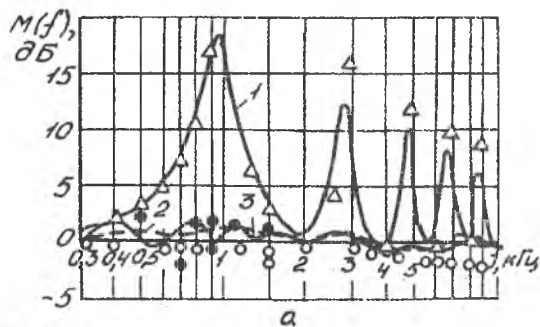
Для проверки влияния объема полости на входе в датчик ИУ использовался малогабаритный датчик пульсаций давления 8506 фирмы Эндево (США). Сигналы с ИУ с датчиком ДДБ-002Т или 8506 и контрольного датчика 4135 подавались через предусилитель типа 2619 на процессор 2032 фирмы Брюль и Кьер. Обработка сигналов производилась в диапазоне частот от 0,26 до 25,6 кГц по ста неперекрывающимся реализациям длительностью 31 мс. Используемый метод обеспечивал обработку сигналов с погрешностью не более $\pm 0,5$ дБ при когерентности 0,9. При обработке экспериментальных данных учитывался поправочный коэффициент микрофонного датчика 4135. В результате испытаний датчика ДДБ-002Т в отдельности установлено, что он обладает высокой динамической точностью в диапазоне частот до 25 кГц.

Частотные испытания ИУ в высокотемпературных условиях проводились на установке сиренного типа с подключением термокамеры к резонанской трубе (рис. 2). Для создания колебаний давления звуковой частоты использовался электродвигатель постоянного тока, который через подшипниковый блок вращает модулирующий диск с рядом равномерно расположенных по окружности отверстий. Для генерирования пульсаций давления в диапазоне частот (20-1500) Гц использованы модулирующий диск с двенадцатью круглыми отверстиями и сопло с ромбовидной площадью проходного сечения. Для регулирования среднего давления воздуха в рабочей камере генератора служит клапан, установленный на линии подвода сжатого газа к генератору. Контроль среднего давления в рабочей камере осуществляется по манометру, подключенному через гаситель колебаний. Термокамера соединена теплоизолированным каналом с трубчатым нагревательным элементом. В термокамере выполнены отверстия для установки охлаждаемого контрольного датчика пульсаций давления ДДП, датчика температуры ДТ19 и исследуемого ИУ. Охлаждение датчика ДДП (ДДБ-002Т) осу-



Р и с. 2. Схема установки для частотных испытаний устройства для измерения пульсаций давления газа в высокотемпературных условиях: МН1 - манометр ($P_{пр} = 1$ МПа); ВН2, ВН12, ВН21 - вентиль; ЭД3 - электродвигатель постоянного тока (ПО-500); 4 - прерывающий диск; 5 - соленоид; ДЛ6, ДЛ4 - датчик пульсаций давления (ДЛ6-002Т); ГК7 - гаситель колебаний давления; МН8 - манометр ($P_{пр} = 0,4$ МПа); 9 - резонансная труба; МН10 - манометр ($P_{пр} = 0,4$ МПа); ДД11 - датчик пульсаций давления в охлаждаемом корпусе; 13 - капиллярный корректирующий элемент; ДД15-ДД18 - терморезисторные датчики температуры газа; ДД19 - датчик температуры Т95 (термопара Хр-Ал); Н20 - нагреватель газа трубчатый

нествлялось водою через специальную шелковую рубашку в штупере. Кроме того, на входе в чувствительный элемент датчика установлен пористый теплозащитный экран из материала МР [3]. Перед испытаниями ИУ проводилась проверка контрольного охлаждаемого датчика с защитным экраном по отношению к датчику ЛХ-610 при температуре окружающей среды. Исследования показали, что влияние экрана на показания охлаждаемого датчика начинает сказываться лишь с частоты колебаний 1500 Гц. При частоте 2000 Гц показания охлаждаемого датчика занижены на 20% по сравнению с показаниями ЛХ-610. Учитывая возможное дополнительное влияние температуры на показания охлаждаемого датчика было принято решение об ограничении верхней границы рабочего диапазона частот 1000 Гц.

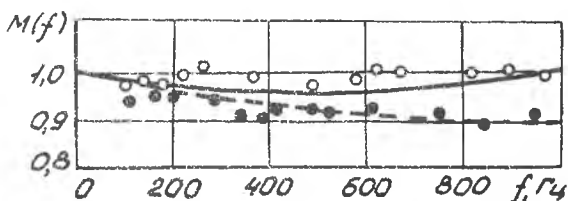


Р и с. 3. Амплитудно-частотная (а) и фазо-частотная (б) характеристики устройства для измерения пульсаций давления газа (см. рис. 3): Δ - расчет; 1 - эксперимент без корректирующего элемента; \bullet - расчет; 2 - эксперимент с капиллярным корректирующим элементом; \circ - расчет; 3 - эксперимент с корректирующим элементом в виде длинной согласованной линии ($N_{кп} = 1$; $d_{кп} = 3$ мм; $l_{кп} = 20$ м)

грешность ИУ с 18 дБ до ± 2 дБ в диапазоне частот (0,3–10) кГц. При этом обеспечивается линейный сдвиг по фазе выходного сигнала ИУ. Из рис. 3 ясно, что по эффективности капиллярный КЭ близок к длинной согласованной линии. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования влияния числа $N_{кп}$ и длины $l_{кп}$ капилляров показали, что наибольшую динамическую точность ИУ обеспечивают КЭ с $N_{кп} = \text{Ent}(1/\bar{d}_{кп}^2)$ и $l_{кп} > (l_{кп})_{\text{расч.}}$, $\bar{d}_{кп}$ - относительный диаметр капиллярного канала.

При проведении испытаний ИУ включается охлаждение датчика, открытием вентилей ВИ2 подается воздух через трубчатый нагревательный элемент Н20 и термокамеру Г9. Изменяя падение напряжения на трубке нагревательного элемента в диапазоне (2–20) В прогревают камеру до заданной температуры ($850 \pm \pm 20$) К. При включении акустического генератора пульсации давления передаются из резонансной трубы в термокамеру и воспринимаются ИУ с контрольным датчиком.

На описанных экспериментальных установках были проведены частотные испытания ИУ, предназначенных для измерения пульсаций давления в широком диапазоне частот. Из частотных характеристик ИУ (рис. 3), определенных при температуре окружающей среды, следует, что применение капиллярного КЭ позволяет снизить динамическую по-



Р и с. 4. Амплитудно-частотная характеристика устройства для измерения пульсаций давления газа с волноводным каналом ($l = 80$ мм, $d = 3$ мм) и корректирующим элементом в виде длинной согласованной линии ($N_{кл} = 1$, $d_{кл} = 3$ мм, $l_{кл} = 20$ м) при различных температурах на входе: — — — расчет; ● — эксперимент при температуре окружающей среды; — — — — — расчет; ○ — эксперимент при температуре 830 ± 20 К

В результате частотных испытаний ИУ с капиллярным КЭ при температуре окружающей среды (293 ± 2) К и повышенной температуре (830 ± 20) К установлено, что увеличение температуры на входе в ИУ приводит к росту его АЧХ, начиная с частоты (130–150) Гц (рис. 4). На верхней границе исследованного диапазона частот модуль частотной функции при высокой температуре превышает на 10% $M(f)$, определенный при температуре окружающей среды. Из проведенного анализа следует, что высокая температура в объекте контроля в какой-то мере способствует снижению динамической погрешности ИУ с КЭ. Таким образом, экспериментальные исследования частотных характеристик ИУ с корректирующими элементами в виде длинной согласованной линии и пучка капиллярных каналов при температуре окружающей среды и высокотемпературных условиях показали достаточно высокую точность методики их расчета (изложенной в [1]) и возможность применения разработанных ИУ при доводке авиационных двигателей.

Библиографический список

1. Гимадиев А.Г. Коррекция частотных характеристик пневматических цепей систем измерения пульсаций давления авиационных ИТД //Авиационная промышленность. 1992. № 6. С. 12–16.
2. Караджи В.Р., Голубкова Л.В. Измерение амплитудно-частотных характеристик приемников давления в акустическом поле сверхзвуковой струи //Гр. ЦИАМ, № 1232. М.: 1987. С. 148–155.
3. Бузицкий В.Н., Сойфер А.М. Цельнометаллические упруго-демпфирующие элементы, их изготовление и применение //Вибрационная прочность и надежность авиационных двигателей: Сб. науч. ст. /Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1965. Вып. 19. С. 259–266.