

УДК 621.534+621.431.75

РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ТРАКТЕ ГТД

© 2014 А. Г. Гимадиев¹, Н. Д. Быстров¹, С. А. Ильинский²¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)²ОАО «Кузнецов», г. Самара

Приведено аналитическое обоснование схемы малогабаритного акустического зонда пульсаций давления, малочувствительного к изменению среднего давления. Описан вариант технической реализации устройства для измерения пульсаций давления в высокотемпературных условиях. Приведены амплитудно-частотные характеристики малогабаритного зонда при различных средних давлениях в объекте контроля.

Газотурбинный двигатель, акустический зонд, пульсации давления, датчик, волноводный канал, динамическая погрешность, корректирующий элемент, RC-фильтр нижних частот, амплитудно-частотная характеристика.

При экспериментальной доводке авиационных и наземных газотурбинных двигателей (ГТД) высоко информативным параметром являются пульсации давления по газо-воздушному тракту. Поскольку условия работы датчиков быстропеременных давлений в точках измерения зачастую не соответствуют допустимым из-за высоких температур и уровня вибраций, наличия взвешенных частиц в продуктах сгорания, то они не могут быть установлены непосредственно в точку измерения. Поэтому находят применение акустические зонды с подводным каналом и акустическим корректирующим элементом, устраняющим искажение измеряемых пульсаций давления из-за резонансов.

В последние годы в ЦИАМ проведён комплекс работ по созданию акустического зонда для повышенных параметров рабочего процесса авиационных и наземных ГТД [1, 2]. Разработан и применён зонд с согласованной акустической нагрузкой в виде длинного 30-метрового трубопровода с внутренним диаметром 4 мм, который прошёл экспериментальную проверку на испытательном стенде ЦИАМ. Для измерения пульсаций давления в газо-воздушном тракте ГТД авторами статьи

разработан зонд с подводным каналом длиной 0,7 м, внутренним диаметром 6 мм и согласующей 40-метровой линией [3]. Однако его широкое применение сдерживается из-за больших габаритов и массы. Поэтому было принято решение о создании зондов с малогабаритным корректирующим элементом, которые можно было бы применять для одновременного измерения пульсаций давления в нескольких точках при наземной отработке ГТД.

При разработке малогабаритного зонда были использованы сосредоточенные дросселирующие элементы, устанавливаемые в характерных сечениях подводного канала [4]. Возможные схемы расположения таких элементов в измерительных цепях приведены на рис.1. В работе [5] показано, что для выравнивания амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) зонда активное акустическое сопротивление дросселя $R_{др}$ должно быть жёстко связано с волновым сопротивлением подводного канала $Z_{в}$. В частности, для схемы зонда на рис. 1, z с расчётным значением объёма V присоединённой ёмкости должно выполняться условие: $R_{др} = Z_{в}$.

Применение сосредоточенных дросселей позволит снизить массу и габариты акустического зонда. Однако существенным недостатком цепей с сосредоточенными дросселями, ограничивающим их

применение, является однорежимность, обусловленная зависимостью акустического сопротивления дросселей от среднего давления.

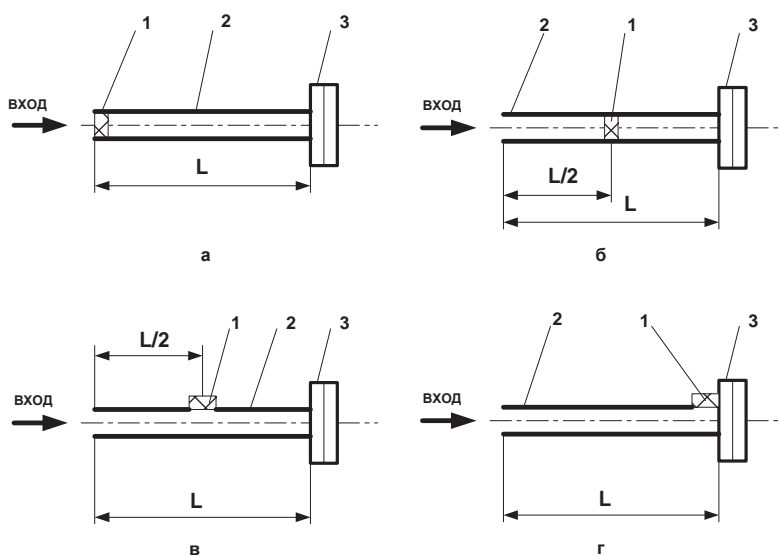


Рис. 1. Принципиальные схемы акустических зондов пульсаций давления с корректирующими элементами:

1 – дроссель с активным акустическим сопротивлением, равным: $Z_{в.ид}$ – для схемы а;

$2Z_{в.ид}$ – для схемы б; $Z_{в.ид}/2$ – для схемы в; $Z_{в.ид}$ – для схемы г;

2 – подводящий канал; 3 – датчик пульсаций давления

Известно, что в идеальном случае (без учёта гидравлических потерь) волновое сопротивление подводящего канала равно

$$Z_{в} = \rho c / S, \quad (1)$$

где ρ – плотность рабочей среды; c – скорость звука; S – площадь поперечного сечения канала.

Из закона Клапейрона – Менделеева следует:

$$\rho = P / (R_g \cdot T), \quad (2)$$

где P – давление газа; R_g – газовая постоянная; T – абсолютная температура.

С учётом равенства $R_{др} = Z_{в}$ и (2), (3) получим:

$$R_{др} = P \cdot c / (S \cdot R_g \cdot T). \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что при постоянном сопротивлении дросселя наилучшее выравнивание АЧХ цепи достигается только при одном значении среднего давления.

Зависимости, описывающие процесс распространения колебаний давления в пневматической линии с остальными корректирующими дросселями, приведены в работах [4, 5].

Ниже рассматриваются особенности пневматической линии, выполненной по дифференциальной схеме, и описан процесс подавления колебаний в разгруженной от действия динамической составляющей давления полости дифференциального датчика давления (рис. 2).

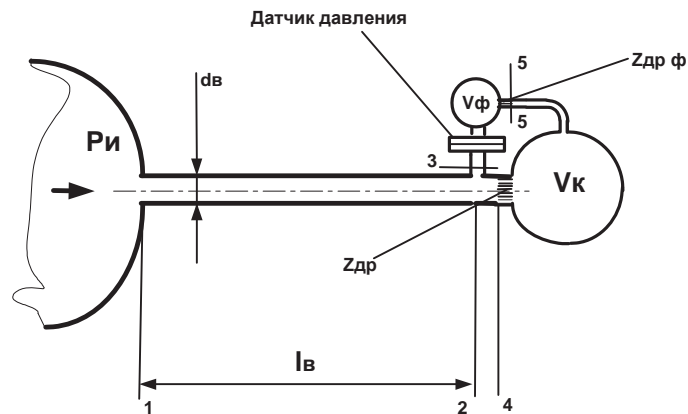


Рис. 2. Расчётная схема пневматической измерительной цепи с корректирующим дросселем, установленным на выходе из волноводного канала

Если выбрать акустическое сопротивление корректирующего дросселя равным волновому сопротивлению подводящего канала, а значение концевой ёмкости – в 20...30 раз превышающим ёмкость подводящего канала, то пульсации давления будут восприниматься датчиком давления без больших динамических искажений. К концевой полости цепи подсоединён акустический фильтр нижних частот (АФНЧ), состоящий из дросселя и ёмкости. Сопротивление фильтра R_ϕ должно быть больше волнового сопротивления подводящего канала Z_ϕ в 10...20 раз. При этом объём полости фильтра выбирается исходя из значения нижней границы диапазона частот ω_n , измеряемых зондом колебаний давления:

$$V_\phi = \frac{kP_{cp}}{\omega_n R_\phi} \sqrt{\frac{1}{M_{mp}^2(\omega_n)} - 1}, \quad (4)$$

где k – показатель адиабаты; P_{cp} – среднее давление на входе в зонд (если режим переменный, то берётся наибольшее значение P_{cp}); $M_{mp}(\omega_n)$ – 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 кор-

ректирующего дросселя необходимо разработать метод расчёта частотных характеристик пневматических информационных цепей с учётом 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 расчёте частотных характеристик пневматических линий принимаем те же допущения, что были сделаны в [4, 5].

Процесс распространения колебаний давления в подводящем канале линии описывается уравнениями вида:

$$\begin{aligned} p_1 &= Ap_2 + Bq_2; \\ q_1 &= Cp_2 + Dq_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где p_1, q_1, p_2, q_2 – комплексные амплитуды колебаний давления и объёмного расхода на входе в подводящий канал и на его выходе; A, B, C, D – коэффициенты матрицы передачи подводящего канала, в общем случае зависящие от площади его проходного сечения (может быть переменной по длине канала), температуры (может быть переменной по длине канала), частоты колебаний и среднего давления.

Для узла соединения дифференциального датчика давления и корректирующего дросселя уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} q_2 &= q_3 + q_4; \\ p_2 &= p_3 = p_4, \end{aligned} \quad (6)$$

где q_3, q_4, p_3, p_4 – комплексные амплитуды колебаний расхода и давления в соответствующих сечениях цепи (рис. 2).

Уравнения для входного дросселя дифференциального датчика давления и ёмкости его рабочей полости запишем в виде:

$$\begin{aligned} p_2 - p_0 &= Z_{\text{од}} q_3; \\ q_3 &= Y_{\text{од}} p_0, \end{aligned} \quad (7)$$

где p_0 – комплексная амплитуда колебаний давления в рабочей полости датчика; $Z_{\text{од}} = \text{Re} Z_{\text{од}} + j \text{Im} Z_{\text{од}}$ – акустический импеданс входного дросселя датчика; $Y_{\text{од}} = j \cdot \omega \cdot V_{\text{од}} / (k \cdot P_{\text{cp}})$ – акустическая проводимость рабочей полости датчика; $V_{\text{од}}$ – объём полости датчика давления.

Аналогично можно записать уравнения для корректирующего дросселя и концевой полости

$$\begin{aligned} p_2 - p_k &= Z_{\text{др}} \cdot q_4; \\ q_4 &= Y_{\text{вк}} \cdot p_k + q_5, \end{aligned} \quad (8)$$

где p_k – комплексная амплитуда колебаний давления в концевой полости; q_5 – комплексная амплитуда колебаний расхода через дроссель АФНЧ; $Z_{\text{др}} = \text{Re} Z_{\text{др}} + j \cdot \text{Im} Z_{\text{др}}$ – акустический импеданс корректирующего дросселя; $Y_{\text{вк}} = j \cdot \omega \cdot V_{\text{к}} / (k \cdot P_{\text{cp}})$ – акустическая проводимость концевой ёмкости.

Дроссель фильтра и его ёмкость описываются зависимостями:

$$\begin{aligned} p_k - p_\phi &= Z_{\text{дф}} \cdot q_5; \\ q_5 &= Y_{\text{вф}} p_\phi, \end{aligned} \quad (9)$$

где p_ϕ – комплексная амплитуда колебаний давления в ёмкости фильтра или в разгрузочной полости датчика давления; $Z_{\text{дф}} = \text{Re} Z_{\text{дф}} + j \cdot \text{Im} Z_{\text{дф}}$ – акустический импеданс дросселя фильтра;

$Y_{\text{вф}} = j \cdot V_\phi / (k \cdot P_{\text{cp}})$ – акустическая проводимость ёмкости фильтра.

С использованием приведённых зависимостей определяются частотные характеристики цепи в виде:

$$M(\omega) = \left| \frac{p_\phi - p_\phi}{p_{\text{всн}}} \right| - \quad (10)$$

модуль частотной функции или амплитудно-частотная характеристика зонда;

$$\varphi(\omega) = \arg \frac{p_\phi - p_\phi}{p_{\text{всн}}} - \quad (11)$$

аргумент частотной функции или фазочастотная характеристика зонда;

$$|Y(\omega)| = \left| \frac{q_1}{p_1} \right| - \quad (12)$$

модуль акустической входной проводимости измерительной цепи;

$$\arg Y(\omega) = \arg \frac{q_1}{p_1} - \quad (13)$$

аргумент акустической входной проводимости измерительной цепи, где $p_{\text{всн}}$ – комплексная амплитуда колебаний давления в объекте испытаний (источнике колебаний).

Аналитическое решение уравнений с целью нахождения частотных характеристик может быть выполнено для цепи с однородными элементами. При учёте распределённости температуры получаются громоздкие выражения. Поэтому для определения частотных характеристик цепи в общем случае целесообразно воспользоваться импедансным методом [6].

По приведённым выше зависимостям вначале определяется акустическая входная проводимость АФНЧ:

$$Y_\phi = q_5 / p_5 = Y_{\text{вф}} / (1 + Y_{\text{вф}} \cdot Z_{\text{дф}}), \quad (14)$$

а затем входная проводимость фильтра с концевой ёмкостью и корректирующим дросселем

$$\begin{aligned} Y_{\text{кф}} &= q_4 / p_2 = \\ &= (Y_{\text{вк}} + Y_\phi) / [1 + Z_{\text{др}} \cdot (Y_{\text{вк}} + Y_\phi)]. \end{aligned} \quad (15)$$

Для датчика пульсаций давления, аналогично случаю с фильтром, опреде-

лим акустическую входную проводимость:

$$Y_o = q_3 / p_2 = Y_{vo} / (1 + Y_{vo} \cdot Z_{od}) \quad (16)$$

и далее по уравнениям (6) акустическую входную проводимость цепи в конце подводящего канала:

$$Y_2 = q_2 / p_1 = Y_{kf} + Y_o. \quad (17)$$

При известной Y_2 из уравнений (5) можно определить акустическую входную проводимость цепи:

$$Y_1 = q_1 / p_1 = (C + D \cdot Y_2) / (A + B \cdot Y_2), \quad (18)$$

которая является одной из искомым функций.

В том случае, когда подводящий канал является акустически неоднородным, уравнение (18) записывают и вычисляют Y_1 столько раз, на сколько однородных участков разбит подводящий канал.

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

$$\begin{aligned} p_1 &= p_{ист}; \\ q_1 &= Y_1 \cdot p_1. \end{aligned} \quad (19)$$

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

$$\begin{aligned} p_2 &= A \cdot p_1 - B \cdot q_1; \\ q_2 &= -C \cdot p_1 + D \cdot q_1. \end{aligned} \quad (20)$$

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

$$q_3 = Y_o \cdot p_2; \quad q_4 = Y_{kf} \cdot p_2 \quad (21)$$

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

$$\begin{aligned} p_o &= p_2 - Z_{od} \cdot q_3; \\ p_k &= p_2 - Z_{op} \cdot q_4. \end{aligned} \quad (22)$$

Из уравнения (8) находим расход q_5

$$q_5 = q_4 - Y_{vk} \cdot p_k \quad (23)$$

и далее расход в полости фильтра или разгрузочной полости датчика

$$p_o = \left[(1 + Z_{of} \cdot Y_{vk})(1 - Z_{op} \cdot Y_{kf}) - Z_{of} \cdot Y_{kf} \right] p_2. \quad (24)$$

При известных p_o и p_f находим перепад давления $p_o - p_f$ и далее вторую искомую частотную функцию цепи:

$$W(j\omega) = (p_o - p_f) / p_{ист}. \quad (25)$$

Таким образом, из совместного решения уравнений (4)...(25) для каждой заданной частоты колебаний определяются модули и аргументы частотных функций, на основе которых строятся частотные характеристики цепи.

Полученные зависимости легли в основу программного комплекса РУДИП по расчёту частотных характеристик пневматических линий, входящих в состав акустических зондов. С помощью программы в качестве примера оценена способность пневматической линии к передаче быстропеременных давлений.

Проведен расчёт АЧХ акустической измерительной линии, содержащей недифференциальный датчик пульсаций давления с сосредоточенным дросселем коррекции, входящим в структуру АФНЧ, при следующих условиях: диаметр подводящего канала – 6 мм; длина подводящего канала – 700 мм; объём расширительной камеры – 200 см³; сопротивление дросселя – 1,39·10⁸ Па·с/м³; температура – 300 К; диапазон частот пульсаций давления – от 10 до 2000 Гц. Указанное выше сопротивление дросселя коррекции соответствует волновому сопротивлению подводящего канала при давлении 10 кгс/см². Расчёт АЧХ проведён в программе РУДИП для значений среднего давления 5, 10 и 20 кгс/см². АЧХ подводящего канала при среднем давлении 10 кгс/см² иллюстрирует приемлемую равномерность передачи быстропеременных давлений по амплитуде: +8% -12% в диапазоне частот до 2000 Гц (рис. 3).

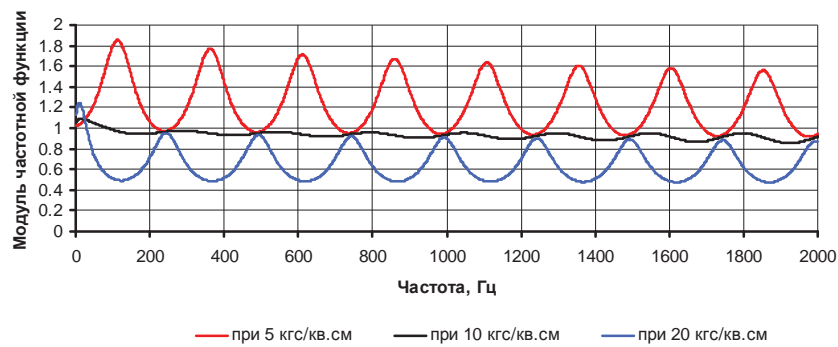


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика акустического зонда с волноводом $D_{\lambda 6}$ длиной 700 мм при различных средних давлениях с корректирующим RC-элементом на входе в датчик пульсаций давления с сопротивлением $1,415 \text{ E}8 \text{ Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$, равным волновому сопротивлению волновода при среднем давлении $10 \text{ кгс}/\text{см}^2$

При использовании дросселя коррекции с активным сопротивлением, превышающим требуемое по условиям согласования значение в два раза, неравномерность АЧХ составляет +80 % -12 %, а при использовании дросселя коррекции с активным сопротивлением, меньшим требуемого по условиям согласования значения в два раза, неравномерность АЧХ составляет +22 % -50 % в рассмотренном диапазоне частот.

Из результатов проведенных исследований ясно, что для обеспечения рав-

номерной АЧХ зонда необходимо изменять акустическое сопротивление дросселя пропорционально среднему давлению рабочей среды. Для этого авторами разработано корректирующее устройство, представленное на рис. 4.

Корректирующее устройство, будучи подключенным к зонду, содержащему волноводный канал и датчик быстропеременных давлений, обеспечивает измерение пульсаций в широком диапазоне среднего давления.

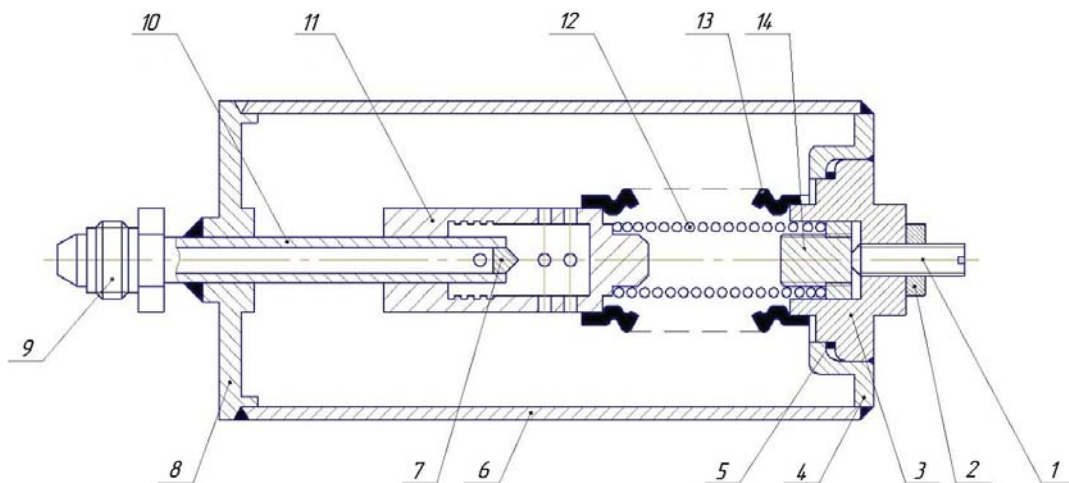


Рис. 4. Корректирующее устройство акустического зонда пульсаций давления:
 1 – настроечный винт; 2 – контргайка; 3 – опора сильфона; 4 – стенка расширительной камеры;
 5 – уплотнительное кольцо; 6 – наружная оболочка расширительной камеры; 7 – заглушка;
 8 – стенка расширительной камеры с подводящим каналом; 9 – штуцер; 10 – подводящий канал;
 11 – обойма регулируемого дросселя; 12 – пружина; 13 – сильфон; 14 – упор пружины

Устройство состоит из корпуса расширительной камеры, который сформирован двумя стенками 4 и 8, приваренными к торцам цилиндрической оболочки 6. Внутри расширительной камеры установлен регулируемый дроссель с активным сопротивлением, величина которого автоматически изменяется в зависимости от среднего давления в объекте измерения.

Регулируемый дроссель состоит из цилиндрического канала 10, заглушенного по сечению заглушкой 7, по которому по ходовой посадке перемещается обойма 11, соединённая с сильфоном 13. Для увеличения эффективности регулируемого дросселя на участке обоймы 11, прилегающей к подводящему каналу 10, выполнены внутренние кольцевые проточки. С другой стороны сильфон герметично соединён с опорой сильфона 3. Внутри сильфона размещена пружина 12. При нарушении равновесия сил сильфон перемещает обойму регулируемого дросселя. Поскольку изменяется взаимное расположение канала 10 и обоймы 11, то меняется и сопротивление регулируемого дросселя, причём с возрастанием среднего давления растёт и сопротивление дросселя. Дросселирование пульсирующего потока газа осуществляется в щелевом зазоре между обоймой и подводящим каналом, причём протяжённость щели, в которой происходит рассеяние колебательной энергии, меняется в зависимости от среднего давления.

Сильфон 13 с внешней стороны находится в процессе работы акустического зонда под действием давления в

объекте измерения, а с внутренней – под действием атмосферного давления за счёт вентиляционного канала, выполненного в опоре сильфона. Избыток силы, приходящейся на сильфон от действия давлений, уравнивается цилиндрической пружиной сжатия 12. Разобщение рабочей полости расширительной камеры устройства с атмосферой обеспечивается уплотнительной прокладкой 5. Подвод пульсирующего давления к акустическому дросселю осуществляется через штуцер 9.

После сборки устройства производят его настройку посредством перемещения в осевом направлении сильфона с обоймой дросселя 12 подбором колец 5, чтобы при подаче начального давления обойма щелевого дросселя занимала положение, обеспечивающее сопротивление регулируемого дросселя, равное волновому сопротивлению подводящего трубопровода при начальном давлении. Регулировочный винт 1 используется для начальной коррекции АЧХ акустического зонда.

Предлагаемое устройство обеспечит меньшую зависимость АЧХ акустического зонда от изменения среднего давления, связанного с изменением режима работы энергоустановки, и удобство в эксплуатации из-за его относительно малых габаритов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010 г.

Библиографический список

1. Фурлетов В.И., Ведешкин Г.К. Обеспечение термоакустической устойчивости в низкоэмиссионных камерах сгорания // Экологические проблемы авиации. Раздел 3. Эмиссия вредных веществ от газотурбинных установок; под ред. Ю.Д. Халецкого. М.: ТОРУС-ПРЕСС, 2010. С. 433-450.

2. Фурлетов В.И., Дубовицкий А.Н., Ханян Г.С. Определение частотной харак-

теристики измерительной системы «датчик колебаний давления – волновод» при повышенных параметрах газа // Развитие средств и методов испытаний авиационных двигателей: сб. статей. М.: ЦИАМ, 2010. 252 с.

3. Шорин В.П., Гимадиев А.Г., Быстров Н.Д., Ильинский С.А., Александрова Т.Г. Разработка и экспериментальное исследование частотных характери-

стик акустических зондов для измерения пульсаций давления в газогенераторе // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2012. № 3(34), ч.2. С. 269-274.

4. Гимадиев А.Г., Быстров Н.Д., Устинов А.В. Разработка методики и программы расчёта неоднородных газовых измерительных цепей // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. 2012. № 3(34), ч.2. С. 263-268.

5. Шорин В.П., Шахматов Е.В., Гимадиев А.Г., Быстров Н.Д. Акустические методы и средства измерения пульсаций давления. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 132 с.

6. Гимадиев А.Г., Быстров Н.Д. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем: электрон. конспект лекций. Мино образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2010. 179 с.

Информация об авторах

Гимадиев Асгат Гатъятович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: iam@ssau.ru. Область научных интересов: динамика пневмогидравлических систем управления и контроля энергетических установок.

Быстров Николай Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических

установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: iam@ssau.ru. Область научных интересов: коррекция динамических характеристик систем измерения давления при испытаниях ГТД.

Ильинский Станислав Алексеевич, начальник отдела, ОАО «Кузнецов», г. Самара. E-mail: sntk@sntk.saminfo.ru. Область научных интересов: измерение параметров при стендовых испытаниях ГТД.

DEVELOPMENT OF A SMALL-SIZED ACOUSTIC PROBE FOR THE MEASUREMENT OF PRESSURE PULSATIONS IN THE GASDYNAMIC DUCT OF GAS TURBINE ENGINES

© 2014 A. G. Gimadiyev, N. D. Bystrov, S. A. Ilyinsky

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation
Open Joint Stock Company “Kuznetsov”, Samara, Russian Federation

The paper presents a mathematical analytical justification of the scheme of a small-sized acoustic probe of pressure pulsations insensitive to changes in the average pressure. An option of engineering implementation of a device for measuring pressure pulsations in high-temperature conditions is described. Amplitude-frequency characteristics of a small-sized probe at various values of the average pressure in the unit under test are given.

Gas-turbine engine, acoustic probe, pressure pulsations, sensor, waveguide channel, dynamic error, correcting element, RC- low-pass filter, frequency response.

References

1. Furletov V.I., Vedeshkin G.K. Ensuring thermoacoustic stability in low-emission combustion chambers // Environmental problems of aircraft. Section 3 Emission of harmful substances from gas-turbine installations / Edited by Yu.D. Khaletsky. Moscow: TORUS-PRESS Publ., 2010. P. 433-450.
2. Furletov V.I., Dubovitsky A.N., Hanyan G.S. Determining the frequency characteristic of a measuring system «sensor of pressure fluctuations wave guide» with increased parameters of gas // Razvitie sredstv i metodov ispytaniy aviatsionnykh dvigateley (Sbornik statey). Moscow: TsIAM, 2010. 252 p.
3. Shorin V.P., Gimadiyev A.G., Bystrov N.D., Ilyinsky S.A., Alexandrova T.G. On the development of probes for measuring pressure pulsations in the gas-dynamic channel gas generator // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. 2012. No. 3(34), part 2. P. 269-274. (In Russ.)
4. Gimadiyev A.G., Bystrov N.D., Us tinov A.V. Development of techniques and calculation program heterogeneous gas measurement circuits // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. 2012. No. 3(34), part 2. P. 263-268. (In Russ.)
5. Shorin V.P., Shakhmatov E.V., Gimadiyev A.G., Bystrov N.D. Akusticheskie metody i sredstva izmereniya pul'satsiy davleniya [Acoustic methods and facilities of measuring pressure pulsations]. Samara: SSAU Publ., 2007. 132 p.
6. Gimadiyev A.G., Bystrov N.D. Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem: elektron. konspekt lektsiy [Dynamics and regulation of hydro- and pneumatic systems: online abstract of lectures]. Samara: SSAU Publ., 2010. 179 p.

About the authors

Gimadiev Asgat Gatjatovich, Professor of the Department of Automated Systems of Power Plants, Samara State Aerospace University. E-mail: iam@ssau.ru. Area of research: correction of dynamic characteristics of pressure measurement systems in gas turbine engine tests.

Bystrov Nikolay Dmitrievich, Professor of the Department of Automated Systems of Power Plants, Samara State Aerospace

University. E-mail: iam@ssau.ru. Area of research: correction of dynamic characteristics of pressure measurement systems in gas turbine engine tests.

Ilyinsky Stanislav Alekseevich, Head of Department, Open Joint Stock Company “Kuznetsov”. E-mail: sntk@sntk.saminfo.ru. Area of research: correction of dynamic characteristics of pressure measurement systems in gas turbine engine tests.