

## ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА СТЕНДЕ ДЛЯ ЧАСТОТНЫХ ИСПЫТАНИЙ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ПУЛЬСАЦИЙ И ДАТЧИКОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННОМ СРЕДНЕМ ДАВЛЕНИИ

**Быстров Н.Д.**  
**Сафин А.И.**  
**Радин Д.В.**  
**Матвеев С.С.**

Самарский национальный  
исследовательский университет  
имени академика С. П. Королёва  
(Самарский университет)

Московское шоссе, д. 34,  
г. Самара, 443086,  
Российская Федерация

[bystrof-nd@ya.ru](mailto:bystrof-nd@ya.ru)

*Известно, что пульсации давления в газозоудушном тракте оказывают существенное влияние на работоспособность различных энергетических установок, в том числе газотурбинного двигателя, снижая запас газодинамической устойчивости компрессора, снижая полноту сгорания топлива в камере сгорания. Для доводки двигателя с учётом пульсаций давления необходимы средства их измерения в широком диапазоне частот. В этой связи созданный усилиями молодых инженеров и аспирантов кафедры автоматических систем энергетических установок (АСЭУ) стенд для частотных испытаний аппаратуры и исследования пульсационных процессов в газозоудушном тракте ГТД успешно применяется в Самарском университете. На стенде проводились и проводятся разнообразные испытания акустических зондов и других средств для динамических измерений. В частности для двигателестроительного предприятия проведен комплекс частотных испытаний, отдельные результаты которых приведены в предлагаемой читателю работе. Следует также отметить, что работоспособность стенда далеко не исчерпана и кроме того область применения стенда может быть существенно расширена.*

*Материал статьи может быть полезен специалистам, разрабатывающим и применяющим средства измерения пульсаций давления в экстремальных условиях их эксплуатации, например, при доводке газотурбинных двигателей.*

**Ключевые слова:** стенд для частотных испытаний; объекты испытаний; амплитуда колебаний давления; среднее давление воздушной среды; амплитудно-частотные характеристики; генератор колебаний давления; частотный диапазон

### 1 Введение

При доводке газотурбинных двигателей чрезвычайно важно иметь достоверную информацию о динамических процессах, имеющих место в газодинамическом тракте [1]. Например, пульсации давления по тракту газогенератора влияют существенно на газодинамическую устойчивость компрессора и на процесс горения в камере сгорания. [2]. Для измерения пульсаций давления в экстремальных для датчиков условиях применяют акустические зонды, позволяющие вынести датчик из зоны действия дестабилизирующего фактора [3]. Однако при

этом в подводящем канале зонда возникают резонансы, которые без применения специальных корректирующих элементов могут исказить в десятки раз уровень измеряемых пульсаций давления [4]. Вновь создаваемые акустические зонды, а также другие средства для измерения пульсаций давления нуждаются в проверке их работоспособности и аттестации их метрологических характеристик при работе в условиях пульсирующего давления.

В этой связи в Самарском университете создан стенд для испытаний акустических зондов и аппаратуры, позволяющий обеспечивать частотные испытания при повышен-

ных давлениях, равных или близких эксплуатационным в воздушной среде, а также проводить частотные испытания различных агрегатов ГТД. Следует отметить, что стенд модернизировался усилиями молодых инженеров и аспирантов при непосредственном участии и руководстве профессора Ги-мадиева А.Г.

## 2 Основные элементы стенда

Пневматическая схема стенда представлена на рисунке 1 [5]. Основным узлом стенда для частотных испытаний пневматических устройств является генератор колебания давления. Генератор колебания давления состоит из электромеханического привода и рабочей камеры с резьбовыми отверстиями для установки датчиков давления и подключения испытываемой аппаратуры. Для регулирования давления воздуха в рабочей камере генератора пульсаций давления используется редуктор давления, установленный за ёмкостью высокого давления С1 (200 МПа), и вентили на входе и выходе из генератора пульсаций давления. Контроль среднего давления воздуха в рабочей камере С2 осуществляется по манометру М3 (рисунок 1). Общий вид генератора колебаний с испытательной камерой с контрольным датчиком быстропеременных давлений PS 2001 и экспериментальным акустическим зондом представлен на рисунке 2. В свою очередь на рисунке 3 показана испытательная камера генератора.

Стенд (рисунок 1) подключается к ёмкости высокого давления С1, входящей в состав компрессорного оборудования Самарского университета, что позволяет обеспечить большой расход рабочей среды и, следовательно, значительные амплитуды пульсаций давления. Частотные испытания проводились при средних давлениях до 1,5 МПа. Статические испытания блока, генерирующего колебания давления, проводились при давлении 4 МПа. Предусмотрена шумовая изоляция генератора колебаний с помощью защитных экранов от других элементов стенда, а также для защиты персона-

ла. Конструктивная схема блока генерации колебаний давления приведена на рисунке 3.

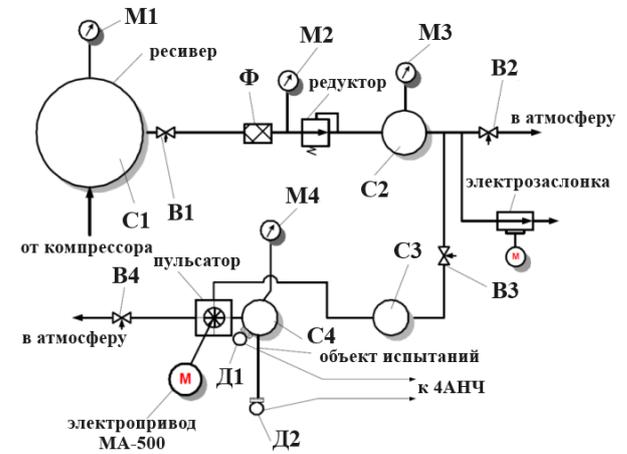


Рисунок 1. Пневматическая схема стенда для частотных испытаний пневматических цепей при высоком давлении: М1, М2, М3, М4 – манометры; В1, В2, В3, В4 – вентили; С1, С2, С3, С4 – ёмкости; Ф – фильтр воздушный; Д1, Д2 – датчики пульсаций давления

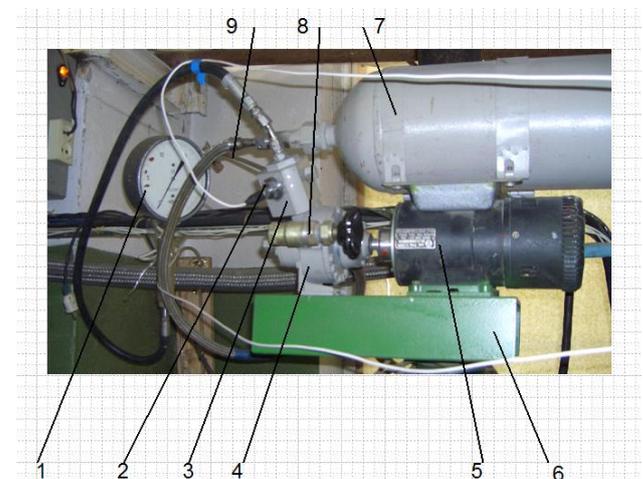


Рисунок 2. Общий вид генератора колебаний с испытательной камерой, с контрольным датчиком быстропеременных давлений PS 2001:

1 – манометр 0–2,5 МПа; 2 – датчик быстропеременных давлений PS 2001; 3 – испытательная камера генератора; 4 – блок, генерирующий колебания давления; 5 – электропривод МА-500; 6 – монтажная плата; 7 – буферная ёмкость; 8 – вентиль; 9 – подводящий патрубок испытываемого акустического зонда

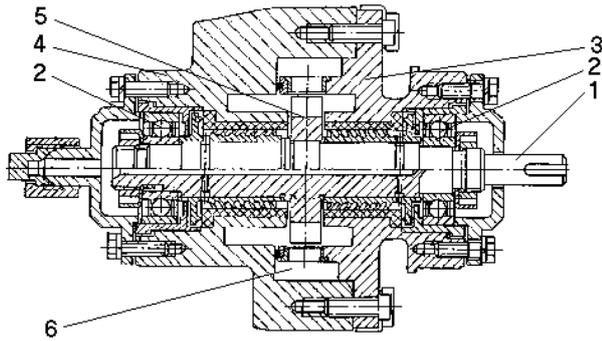


Рисунок 3. Конструктивная схема блока, генерирующего колебания давления: 1 – приводной вал; 2 – подшипник; 3 – крышка корпуса; 4 – корпус; 5 – модулирующий диск; 6 – расширительная камера генератора

Частотные испытания пневматических устройств проводились в диапазоне частот от 50 до 800 Гц. Основные характеристики генератора колебаний давления представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики генератора колебания давления

№ п/п	Параметры	Значения
1.	Среднее давление воздуха, МПа	До 2,5
2.	Диапазон частот генерируемых колебаний, Гц	до 800 Гц
3.	Диапазон амплитуд пульсаций давления, МПа	0,001...0,02
4.	Потребляемая электрическая мощность, кВт	0,5
5.	Средняя температура, °С	атмосферная



Рисунок 4. Узел испытательной камеры с датчиком давления и акустическим зондом

Уровень генерируемого сигнала в зависимости от частоты колебаний при среднем давлении воздуха 1,0 МПа в качестве примера представлен на рисунке 5 в диапазоне частот 10–625 Гц.

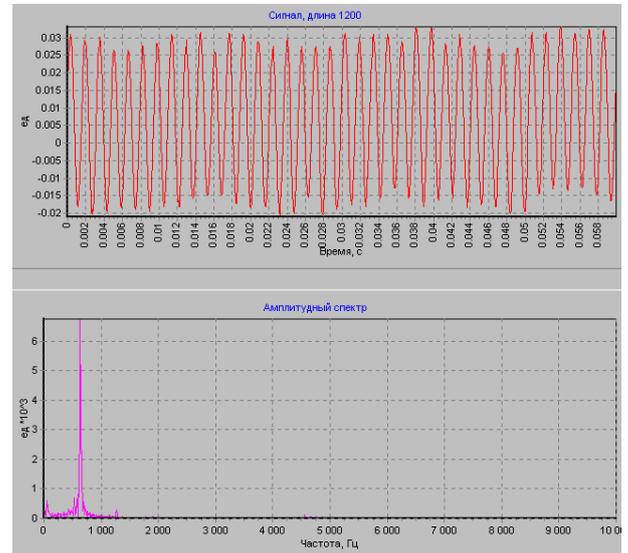


Рисунок 5. Форма сигнала в рабочей полости пульсатора (вверху) и амплитудный спектр сигнала при основной частоте 635 Гц (внизу) при среднем давлении воздуха 1,0 МПа (осциллограмма)

При частотных испытаниях на воздушном стенде высокого давления в качестве контрольных могут применяться различные датчики. Для работы дифференциального датчика был разработан специальный герметичный корпус, позволивший проводить испытания при высоких стационарных давлениях.

### 3 О методике проведения частотных испытаний акустических зондов и обработке экспериментальных данных

Перед проведением эксперимента осуществлялась настройка измерительных каналов, вводились паспортные данные калибровки датчиков динамического давления. После этого осуществлялась подача сжатого воздуха, производилась отладка среднего давления, затем подавалось электропитание на электропривод (рисунок 2). С помощью регулятора напряжения устанавливалась наименьшая частота вращения привода и включалась запись сигналов с датчиков

пульсирующих давлений (рисунок 2), затем осуществлялось плавное увеличение частоты вращения электропривода генератора вплоть до максимального значения в течение 60+–5 секунд, проводилась выдержка в течение 1-2 секунд, после чего следовало плавное снижение частоты вращения до наименьшего значения и выключение записи.

На работающем экспериментальном оборудовании проводились испытания зондов для измерения пульсаций давления по тракту ГТД при средних давлениях 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 МПа и амплитудах колебаний давления до 2 кПа в диапазонах частот: 5...800 Гц.

Сигналы с зондов и контрольного датчика, размещённого на генераторе колебаний, во время испытаний передавались на аппаратуру МІС-26 и записывались в её память для хранения и последующей обработки. Для обработки информации с целью построения частотных характеристик зондов использовалось программное обеспечение МІС-026.

Работа с датчиками давления PS-2001 (настройка измерительной аппаратуры, запись сигналов и обработка информации) осуществлялась совместно с сотрудниками ПАО «Кузнецов».

Методика обработки экспериментальных данных зондов основана на сравнении зарегистрированных показаний датчика зонда и контрольного датчика, установленного в рабочей камере генератора. Сигналы с датчика пульсаций давления акустического зонда или другого устройства и контрольного датчика поступали на вход платы МІС-201 измерительно-вычислительного комплекса МІС-026 и с помощью программы *Recorder* записывались на жёсткий диск компьютера.

Запись сигналов осуществлялась в формате записи данных *MEPA*, который является расширением формата *USML*. При этом программа создает четыре файла с разными расширениями, определяющими тип данных. Диапазон входного сигнала во всех экспериментах устанавливался равным  $\pm 0,2$  В [6].

Экспериментальные данные записывались с частотой опроса, позволяющей достоверно расшифровать пульсации давления в диапазоне частот до 5 кГц. Запись осциллограмм от контрольного датчика и зонда осуществлялась в течение 60 секунд с частотой опроса 57,6 кГц на первый и второй каналы ИВК МІС-026.

Для обработки осциллограмм использовалась программа *WinPos* НПО «Мера». Для получения АЧХ осуществлялся расчёт отношения амплитуды выходного (с датчика зонда) и входного (с контрольного датчика) сигналов в диапазоне частот от 0 до 1 кГц.

Процедура обработки следующая: вызывается программа *WinPos*, открывается окно программы. Загружается файл с записями колебаний давления датчика зонда и контрольного датчика. При открытии файла строятся два графика осциллограмм в одних и тех же осях координат. Затем производится расчёт частотных характеристик, для чего запускается опция «Передаточная функция», по которой рассчитывается АЧХ или модуль частотной функции зонда.

#### 4. О применении частотного стенда

##### 4.1 Определение АЧХ зонда для входного устройства двигателя

Одна из работ на частотном стенде университета состояла в следующем. Для определения запаса газодинамической устойчивости ГТД к неоднородностям воздушного потока на входе проводятся специальные испытания [5]. Для этой цели во входном устройстве двигателя предполагалось устанавливать зонды для измерения пульсаций давления. На каждом зонде должно быть расположено по два модуля для измерения уровня пульсаций давления. Зонды должны быть установлены под углом 90°. С целью подтверждения соответствия характеристик измерительных модулей, предназначенных для установки во входном устройстве, требованиям технического задания в Самарском университете для ПАО «Кузнецов» проведены испытания измерительных моду-

лей по определению их амплитудно-частотных характеристик (рисунок 6).

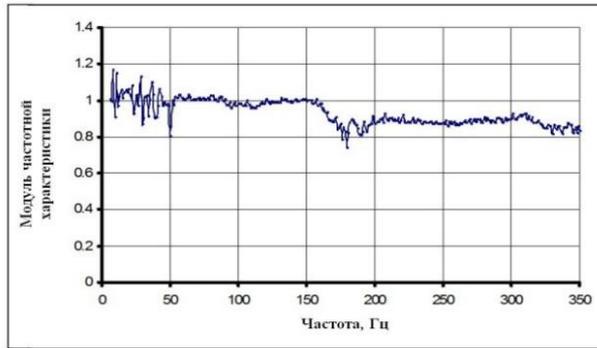


Рисунок 6. Амплитудно-частотная характеристика измерительного модуля с датчика ДМИ-0,6-II при избыточном давлении 50 кПа

Для частотных испытаний измерительного модуля датчика ДМИ на частотном стенде при повышенном уровне амплитуд пульсаций давления (50 кПа) сотрудниками ПАО «Кузнецов» был спроектирован и изготовлен технологический модуль, который через специальный штуцер был подключен к испытательной камере генератора (рисунок 7).

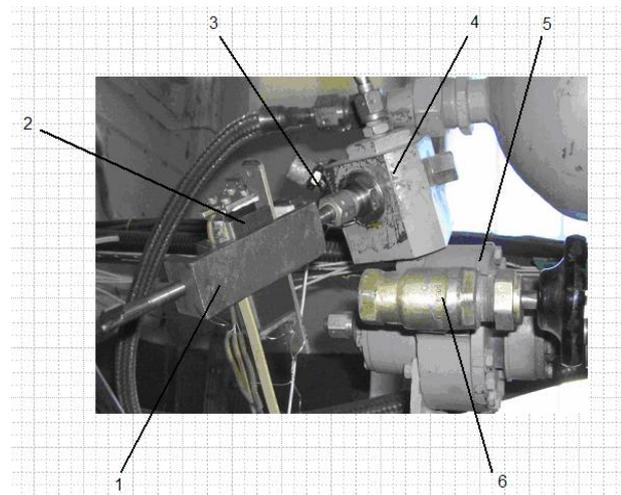


Рисунок 7. Технологический модуль с измерительным датчиком ДМИ, установленный в испытательной камере генератора частотного стенда Самарского университета:

1,2 – технологический модуль и измерительный модуль датчика ДМИ; 3–датчик M102A07; 4 – испытательная камера генератора колебаний; 5 – генератор колебаний; 6 – вентиль воздушный

Результаты частотных измерений показывают, что разработанный акустический зонд позволяет измерять пульсации давле-

ния во входном устройстве. При этом наибольшая неравномерность АЧХ измерительного модуля с датчиком ДМИ-0,6-II, экспериментально определённая на стенде Самарского университета в диапазоне частот 10–350 Гц, находится в пределах  $\pm 10\%$ .

Результаты исследований показывают, что разработанный акустический зонд позволяет измерять пульсации давления во входном устройстве двигателя.

#### 4.2 Экспериментальное исследование волноводных линий как корректирующих элементов акустических зондов

Другой комплекс частотных испытаний состоял в экспериментальной проверке различных средств коррекции частотных характеристик акустических зондов для достижения равномерной передачи колебаний в измерительных средствах [7,8].

В соответствии с рекомендациями Самарского университета и ПАО «Кузнецов» спроектированы и изготовлены два акустических зонда с условными номерами №4 и №5 с датчиком пульсаций давления M102A07 и различными корректирующими элементами (КЭ). В экспериментальных исследованиях указанных выше зондов были использованы следующие корректирующие элементы:

##### Зонд №4

Эксперимент № 07 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – трубопровод 15 м,  $d_3$ , давление 0,4 МПа;

Эксперимент № 08 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – трубопровод 15 м,  $d_3$ , давление 0,6 МПа;

Эксперимент № 09 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – трубопровод 15 м,  $d_3$ , давление 0,8 МПа;

Эксперимент № 10 – подводный волновод  $L=0,79$  м, резиновый шланг  $L=10$  м,  $d_6$ , давление 0,6 МПа;

Эксперимент № 11 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – медная трубка  $L=1,5$  м,  $d_6$  + резиновый шланг  $L=10$  м,  $d_6$ , давление 0,6 МПа;

Эксперимент № 12 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – медный трубопровод 40 м,  $d_{y6}$ , давление 0,4 МПа;

Эксперимент № 13 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – медный трубопровод 40 м,  $d_{y6}$ , давление 0,8 МПа;

Эксперимент № 14 – подводный волновод  $L=0,79$  м, без КЭ, давление 0,4 МПа;

Эксперимент № 15 – подводный волновод  $L=0,79$  м, без КЭ, давление 0,8 МПа;

#### Зонд №5

Эксперимент № 17 – подводный волновод  $L=0,79$  м, без КЭ, давление 0,4 МПа;

Эксперимент № 18 – подводный волновод  $L=0,79$  м, без КЭ, давление 0,6 МПа;

Эксперимент № 19 – подводный волновод  $L=0,79$  м, без КЭ, давление 0,8 МПа;

Эксперимент № 20 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – медный трубопровод 40 м,  $d_{y6}$ , давление 0,4 МПа;

Эксперимент № 21 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – медный трубопровод 40 м,  $d_{y6}$ , давление 0,6 МПа;

Эксперимент № 22 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – медный трубопровод 40 м,  $d_{y6}$ , давление 0,8 МПа;

Эксперимент № 23 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – медный трубопровод 40 м,  $d_{y6}$ , давление 1,0 МПа;

Эксперимент № 24 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – медная трубка  $L=1,5$  м,  $d_{y6}$  + резиновый шланг  $L=1,8$  м,  $d_{y6}$  + резиновый шланг  $L=10$  м,  $d_{y6}$ , давление 0,6 МПа;

Эксперимент № 25 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – резиновый шланг  $L=10$  м,  $d_{y6}$ , давление 0,6 МПа;

Эксперимент № 26 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – трубопровод 15 м,  $d_{y3}$ , давление 0,6 МПа;

Эксперимент № 28 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – медный трубопровод 40 м,  $d_{y6}$ , давление 0,4 МПа; в качестве эталона – датчик PS 2001;

Эксперимент № 29 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – медный трубопровод 40 м,  $d_{y6}$ , давление 0,6 МПа; в качестве эталона – датчик PS 2001;

Эксперимент № 30 – подводный волновод  $L=0,79$  м, КЭ – медный трубопровод 40 м,  $d_{y6}$ , давление 0,8 МПа; в качестве эталона – датчик PS 2001;

Эксперимент № 31 – подводный волновод  $L=0,79$  м, без КЭ; давление 0,8 МПа; в качестве эталона – датчик PS 2001.

АЧХ зондов, определяющих их динамическую точность, проводился для уровней среднего давления 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0 МПа.

Наилучший результат по выравниванию АЧХ зонда достигается при применении корректирующего элемента в виде длинной линии с  $D_{y6}$  и длиной 40 м (рисунок 8).

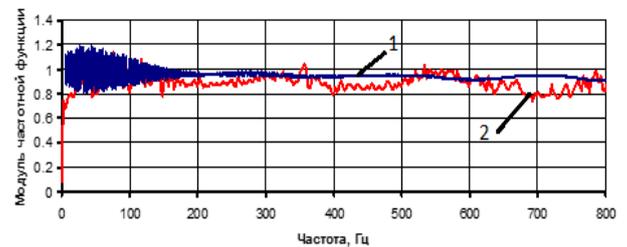


Рисунок 8. Амплитудно-частотная характеристика зонда с волноводом  $D_{y6}$  длиной 0,79 м с объемом полости датчика  $100 \text{ мм}^3$  и корректирующим элементом в виде длинной линии  $D_{y6}$  длиной 40 м при давлении 0,8 МПа и температуре  $18^\circ\text{C}$ :

1 – расчёт по программе ПОВС [ 4], 2 – эксперимент

В значительной части частотного диапазона равномерность передачи колебаний давления лежит в диапазоне  $+5\% - 20\%$ .

Применение корректирующего элемента в виде трубки  $D_{y3}$  длиной 15 м не приводит к выравниванию АЧХ зонда до желаемой величины (рисунок 9), хотя и снижает модуль частотной функции до определённой величины. Было показано, что с увеличением среднего давления диапазон частот равномерного пропускания пульсаций давления в пределах погрешности не более 20% увеличивается.

Для проверки возможности применения КЭ из резиновых шлангов и стабильности частотных характеристик зондов были проведены эксперименты при средних давлениях 0,4; 0,6 и 0,8 МПа.

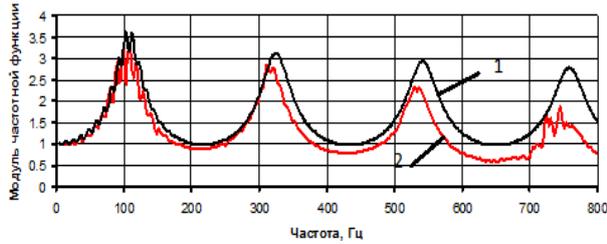


Рисунок 9. Амплитудно-частотная характеристика зонда с волноводом  $D_{y6}$  длиной 0,79 м с объёмом полости датчика 100 мм<sup>3</sup> и корректирующим элементом в виде длинной линии  $D_{y3}$  длиной 15 м при давлении 4 кгс/см<sup>2</sup> и температуре 18 °С: 1 – расчёт по программе ПОВС [ 4], 2 –эксперимент

### 4.3 Частотные испытания компактного акустического демпфера<sup>1</sup>

На рисунке 10 представлена конструктивная схема экспериментального образца зонда с акустическим демпфером [9].

На рисунке 11 представлена конструктивная схема акустического демпфера. В разобранном состоянии тот же демпфер приведён на рисунке 12.

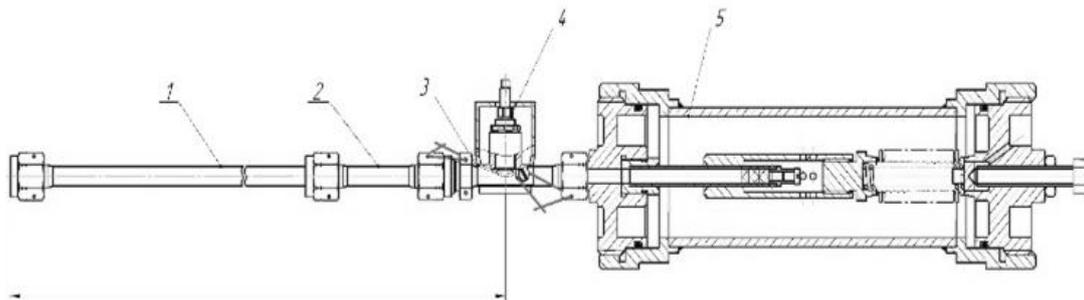


Рисунок 10. Конструктивная схема одного из вариантов экспериментального образца акустического зонда: 1 – подводящий трубопровод ( $d_{y6}$ , длина 0,7 м); 2 – проставка ( $d_{y6}$ , длина 0,05 м); 3 – корпус датчика пульсаций давления; 4 – датчик пульсаций РСВ М102А07; 5 – акустический демпфер

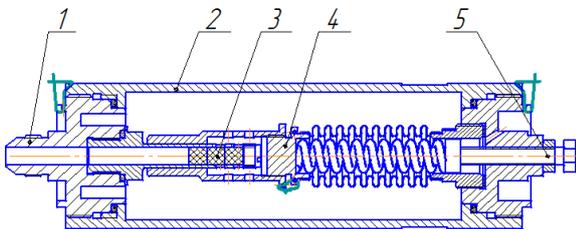


Рисунок 11. Экспериментальный образец акустического демпфера без подводящего волноводного канала

1 – подводящий штуцер; 2 – корпус; 3 – дроссель из материала МР; 4 – блок сильфонный с ползуном; 5 – регулировочный винт



Рисунок 12. Акустический демпфер в разобранном состоянии

Частотные испытания экспериментального зонда осуществлялись на частотном стенде при средних давлениях от 0,2 до 0,8 МПа (абс.) и амплитудах колебаний давления до 2 кПа в диапазонах частот: 5...800 Гц в режиме прямого прохода по нарастающей среднего давления и в режиме обратного хода (последовательного сброса среднего давления вплоть до минимального значения).

<sup>1</sup> Несколько слов о работе акустического демпфера в составе акустического зонда. Пульсации давления проходят из точки измерения в проточном тракте ГТД в подводящий волновод зонда, воздействуют на датчик пульсаций давления и далее проходят в акустический демпфер. Поскольку входное сопротивление акустического демпфера, который по сути является РС-фильтром, согласовано с волновым сопротивлением волновода, то отсутствуют отраженные волны и датчик воспринимает только падающие волны без амплитудных искажений. Особенностью зонда является наличие автоподстройки входного сопротивления демпфера для того, чтобы оно соответствовало волновому сопротивлению подводящего волновода при изменяющемся статическом давлении.

Как указывалось выше, были определены АЧХ экспериментального зонда с акустическим демпфером при различных средних давлениях воздушной среды при последовательном нарастании среднего давления, затем при постепенном снижении среднего давления с целью выявления возможного гистерезиса в узле регулируемого дросселя. На рисунке 13 представлена АЧХ экспериментального зонда с акустическим демпфером (АД) при среднем давлении, равном 0,5 МПа (изб.) [9].

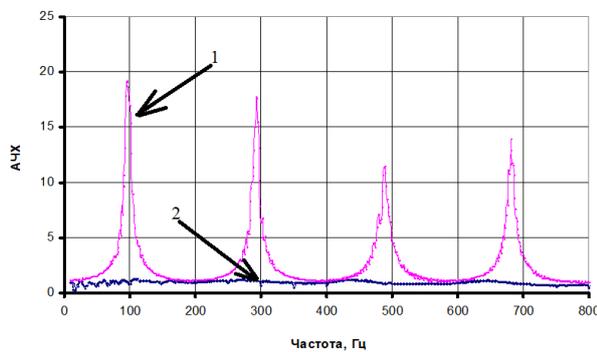


Рисунок 13. Амплитудно-частотные характеристики экспериментального зонда для измерения пульсаций давления: подводный канал 910 мм, диаметр подводного канала 6 мм, среднее давление 0,5 МПа (изб.)

- 1 – резонансная АЧХ – эксперимент без элементов демпфирования резонансных колебаний;
- 2 – нерезонансная АЧХ – эксперимент с элементом демпфирования в виде акустического демпфера

Анализ полученных теоретических и экспериментальных АЧХ показывает, что акустический демпфер выполняет свои функции по созданию условий неотражающей нагрузки и обеспечению равномерной передачи колебаний давления по волноводному каналу зонда для измерения пульсаций давления. В дальнейшем предполагается доработка конструкции акустического демпфера зонда с целью более точного согласования его характеристики с параметрами волноводного канала при изменении среднего давления в объекте контроля.

## 5 Исследование влияния среднего давления на работу различных датчиков пульсаций давления

Были проведены испытания различных датчиков динамического давления, зарубежный датчик Kistler 6021A был сравнен с отечественным аналогом Элскада при различных значениях среднего давления (установка датчиков показана на рисунке 14). Результаты испытаний представлены на рисунке 15, куда также нанесены экспериментальные значения АЧХ зонда.

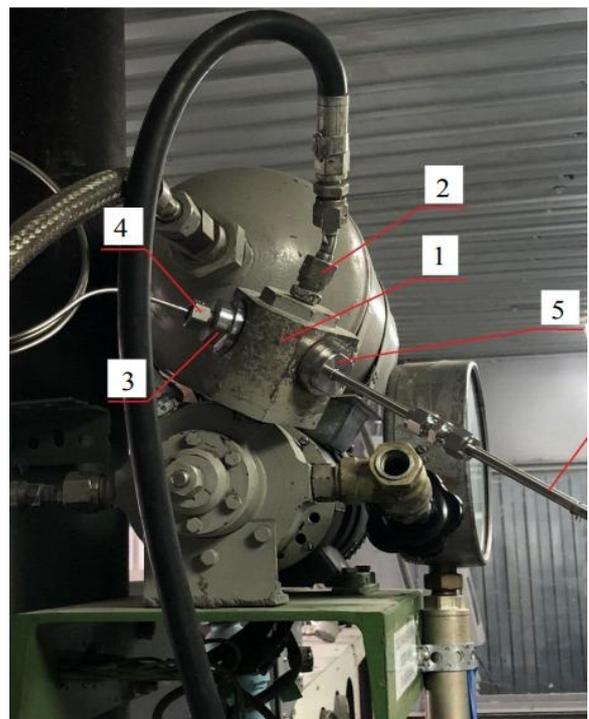


Рисунок 14 – Установка датчика Элскада и эталонного датчика Kistler 6021A к стенду для динамических испытаний средств измерения пульсаций давления при высоком давлении

- 1 – рабочая камера; 2 – штуцер крепления трубки на манометр; 3 – адаптер для установки датчика Kistler 6021A; 4 – датчик Kistler 6021A; 5 – датчик Элскада

Полученные экспериментальные данные подтверждают результаты исследований, посвящённых изучению влияния среднего давления на амплитуду пульсаций давления, что подтверждает возможность использования отечественного датчика, не уступающего зарубежному по

своим характеристикам. Отличие амплитуды измеренных значений динамического давления по сравнению с зарубежным составила менее 3%. Дальнейшая работа будет направлена на исследование влияния высоких температур на работу датчиковой аппаратуры.

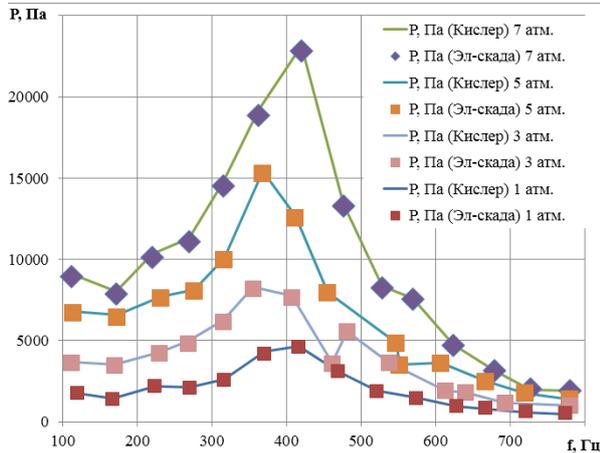


Рисунок 15 – Влияние среднего давления на АЧХ датчика Kistler 6021A в сравнении с отечественным аналогом Элскада

## 6 Заключение

1. По итогам применения стенда можно сделать вывод, что стенд оказался достаточно надёжным в эксплуатации, а это в свою очередь позволило на протяжении нескольких лет проводить частотные испытания.

2. Основные результаты частотных испытаний сводятся к следующим итогам:

а) получены амплитудно-частотные характеристики измерительного модуля, предназначенного для измерения пульсаций давления во входном устройстве ГТД при избыточном давлении 0,05 МПа в частотном диапазоне до 300 Гц с равномерностью АЧХ  $\pm 10\%$ ;

б) проведён комплекс частотных испытаний акустических нагрузок в виде волноводных каналов, позволивший экспериментально подтвердить результаты расчётов и обосновать окончательный выбор акустических нагрузок;

в) разработана и реализована конструкция компактного акустического демпфера

как акустической нагрузки зондов для измерения пульсаций давления при изменении стационарного давления, частотные испытания которого подтвердили возможность его доводки и последующего применения;

г) получены важные результаты взаимной аттестации отечественного и зарубежного датчиков динамического давления с близкими паспортными характеристиками, позволившие отказаться от применения зарубежного датчика;

д) существующий стенд и полученные результаты в рамках проведённых работ дают основание полагать, что работоспособность стенда далеко не исчерпана, а кроме того область применения стенда может быть существенно расширена.

## 7 Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам университета – механикам компрессорной станции Кузьмину В.И. и Лаптеву А.С., обеспечивавшим подачу сжатого воздуха к стенду и текущее обслуживание объектов испытаний и воздушных коммуникаций.

Результаты исследования были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России в области научной деятельности (Проект № FSSS-2023-0008).

## Список использованных источников

[1] Шорин, В.П. Об измерении пульсаций давления в проточной части газотурбинных двигателей / А. Г. Гимадиев, Н. Д. Быстров, С. А. Ильинский // В сб. докл. Междунар. науч.-техн. конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» 28-30 июня 2011 г. – Самара: СГАУ, 2011. – Часть 1. – С. 84-85.

[2] Шорин, В.П. Разработка и экспериментальное исследование частотных характеристик акустических зондов для измерения пульсаций давления в газогенераторе / В.П. Шорин, А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров, С.А. Ильинский, Т.Г. Александрова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – №3(34)-2. – С. 269-274.

[3] Фурлетов, В. И. Определение частотной характеристики измерительной системы «датчик колебаний давления-волновод» при повышенных параметрах газа / В. И. Фурлетов, А. Н. Дубовицкий, Г. С. Ханян // Развитие средств и методов испытаний авиационных двигателей (Сборник статей). Колл. авторов – М.: ЦИАМ, 2010. – 252 с.

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

[5] Гимадиев, А. Г. Динамические испытания зондов для измерения пульсаций давления при повышенных давлениях [Текст] / А. Г. Гимадиев, Н. Д. Быстров, С. А. Ильинский, А. З. Ермошкин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. – 2009. – № 3 (19). – С. 39-42.

[6] Иваненко В. Н. Исследование частотных характеристик акустического зонда для измерения пульсаций давления во входном устройстве газотурбинного двигателя / В. Н. Иваненко, Т. Г. Александрова, Е. С. Дягилева, А. Г. Гимадиев, Н. Д. Быстров // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2015. – Т. 14., № 3-2. – С. 491-500.

[7] Быстров, Н. Д. Об использовании стендовых измерительных трубопроводов в качестве акустических нагрузок зондов пульсаций давления / Н. Д. Быстров, А. Г. Гимадиев // Динамика и виброакустика. – 2021. – Т. 7, № 1. – С. 28-33.

[8] Гимадиев, А. Г. Анализ схем коррекции динамических характеристик акустических зондов для измерения пульсаций давления в газотурбинных двигателях / А. Г. Гимадиев, Е. С. Дягилева, Н. Д. Быстров // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 56-67.

[9] Shorin, V. P. On the Development of a Compact Acoustic Probe for Pressure Oscillation Measurements in Gas Turbine Engine / V. P. Shorin, A.G. Gimadiev // Procedia Engineering. – 2015. – vol. 106. – pp. 46-52.

## FREQUENCY TEST BENCH AND ITS APPLICATION FOR EQUIPMENT TESTING FOR RESEARCH OF PULSATION PROCESSES IN GTEs

**Bystrov N.D.**  
**Safin A.I.**  
**Radin D.V.**  
**Matveev S.S.**

Samara National Research  
 University (Samara University)

34, Moskovskoye shosse,  
 Samara, 443086,  
 Russian Federation

[igolkin.aa@ssau.ru](mailto:igolkin.aa@ssau.ru)

*It is known that pressure pulsations have a significant impact on the performance of various power plants, including the gas turbine engine, reducing the compressor stall margin and the combustion efficiency in the combustion chamber. Engine development with account for pressure pulsations requires measuring equipment for increased pressure, temperature and vibration pulsations over a wide frequency range. In this regard, the frequency test bench created by the efforts of young engineers and graduate students of the Automatic Systems of Power Plant Department is successfully used at Samara University to check the equipment for research of pulsation processes in GTEs. A variety of acoustic probes and other dynamic measurement tools have been and are being tested on the bench. In particular, a set of frequency tests has been carried out for the engine-building enterprise, some results of which are given in this article. It should also be noted that the performance capability of the test bench is far from exhausted and, in addition, the scope of application of the test bench can be significantly expanded.*

*The material of the article can be useful for specialists who develop and apply measuring equipment for pressure pulsations in stress conditions, for example, at the stage of gas turbine engine development.*

**Keywords:** *frequency test bench; test unit; pressure oscillation amplitude; air medium average pressure; amplitude-frequency response; pressure oscillator; frequency range*

## References

- [1] Shorin, V.P., Gimadiev A.G., Bystrov, N.D. and Ilyinsky, S.A. (2011), "On the measurement of pressure pulsations in the air-gas channel of GTEs", *Proceedings of the Intern. scientific-technical conference "Problems and prospects of engine building development" June 28-30, 2011*, Samara, pp. 84-85. (in Russian).
- [2] Shorin, V.P., Gimadiev, A.G., Bystrov, N.D., Ilyinsky, S.A. and Aleksandrova, T.G. (2012), "Development and experimental study of frequency characteristics of acoustic probes for measuring pressure pulsations in a gas generator", *Vestnik of Samara University*, no.3(34)-2, pp. 269-274. (in Russian).
- [3] Furletov, V. I., Dubovitsky A. N. and Khanyan G. S. (2010), "Determination of the frequency response of the measuring system "pressure oscillation sensor-waveguide" at elevated gas parameters", *Development of means and methods of testing aircraft engines (Collection of articles)*, Central Institute of Aviation Motors, Moscow. (in Russian).
- [4] Shorin, V. P., Shakhmatov, E. V., Gimadiev, A. G and Bystrov, N. D. (2007), *Akusticheskie metody i sredstva izmereniya pul'satsiy davleniya* [Acoustic methods and means of pressure pulsation measurement], Samara State Aerospace University Press, Samara. (in Russian).
- [5] Gimadiev, A. G., Bystrov, N. D., Il'inskiy, S. A. and Ermoshkin, A. Z. (2009), "Dynamic tests of probes for measuring pressure pulsations at elevated pressures" [Text], *Vestnik of Samara University*, no. 3(19), pp. 39-42. (in Russian).
- [6] Ivanenko, V. N., Aleksandrova, T. G., Dyagileva, E. S., Gimadiev, A. G. and Bystrov, N. D. (2015), "Research of frequency characteristics of an acoustic probe for measuring pressure pulsations in the inlet of a gas turbine engine", *Vestnik of Samara University*, vol. 14, no.3-2, pp. 491-500. (in Russian).
- [7] Bystrov, N. D. and Gimadiev, A. G. (2021), "About use of bench measuring pipelines as acoustic loads of pressure pulsation probes", *Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 7, no. 1, pp. 28-33. (in Russian).
- [8] Gimadiev, A. G., Dyagileva, E. S. and Bystrov, N. D. (2018), "Analysis of correction schemes of dynamic characteristics of acoustic probes for measuring pressure pulsations in gas turbine engines", *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 56-67. (in Russian).
- [9] Shorin, V. P. and Gimadiev, A. G. (2015), "On the Development of a Compact Acoustic Probe for Pressure Oscillation Measurements in Gas Turbine Engine", *Procedia Engineering*, vol. 106, pp. 46-52.