

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СТЕНДОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В КАЧЕСТВЕ АКУСТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЗОНДОВ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Н.Д. Быстров,
А.Г. Гимадиев

Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва

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

bystrof-nd@ya.ru

При доводке ГТД на рабочие параметры с учетом пульсаций давления в тракте газогенератора применяются акустические зонды с выносом датчика из зоны с высокой температурой. Подводящий волновод, входящий в состав зонда, является акустически резонирующим элементом, значительно искажающим результат измерения. Среди разнообразных корректирующих элементов для акустических зондов на практике особая роль отводится не отражающим нагрузкам в виде длинных линий. Производственникам при стендовых испытаниях часто целесообразно применять помимо длинных линий конструкции, составленные из дюритовых шлангов с короткими отрезками металлических трубопроводов. В прилагаемом материале показаны результаты испытаний модельного зонда с несколькими видами таких согласованных нагрузок. Показана возможность такого решения для повышения точности измерения пульсаций давления в условиях повышенных температур.

Ключевые слова: ГТД; газо-воздушный тракт; пульсации давления; зонд; акустическая нагрузка; длинная линия; частотная характеристика

1 Введение

Измерение пульсаций давления в воздушно-газовом тракте современных газотурбинных двигателя вошло в практику их стендовых доводочных испытаний.

Пульсации давления измеряют во входных устройствах [1, 2], за компрессорами среднего и высокого давления [3, 4], в камере сгорания [5], а в ряде случаев в выхлопных устройствах двигателя.

Для измерения пульсаций давления отдается предпочтение датчикам с пьезоэлементом в качестве чувствительного элемента, как обеспечивающего более широкий диапазон частот измерения. Двигателестроительным фирмам по-прежнему нужны датчики не только с широким диапазоном частот измерения, но и выдерживающие высокие средние давления и температуры рабочей среды, причём способные работать в течении продолжительного времени.

В этой связи измерение пульсаций давления в ГТД осуществляется с помощью акустических зондов. Подводящий волновод, входящий в состав зонда является резонирующим элементом, значительно искажающим передаваемые к датчику давления колебания [6].

Среди разнообразных корректирующих элементов зондов на практике особую роль играют не отражающие нагрузки в виде длинных линий. В ряде стендовых испытаний бывает более технологичным применение длинных стендовых измерительных линий, составленных из дюритовых шлангов или совокупности дюритовых шлангов и отрезков металлических трубопроводов. В прилагаемом материале показаны результаты испытаний модельного зонда с несколькими видами акустических нагрузок для обеспечения приемлемой равномерности его амплитудно-частотной характеристики.

2 Основные технические данные модельного акустического зонда-объекта экспериментальных исследований

Эксперименты по изучению влияния геометрических характеристик длинных линий, изготовленных из различных материалов, на амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) модельного зонда, проводились на частотном стенде Самарского университета при средних давлениях до 14 кгс/см^2 , температурах $18^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}$ и частотах до 850 Гц . В качестве модельного зонда использовался волновод Дуб из стали X18H9T длиной $0,79 \text{ м}$.

В ряде случаев наряду с экспериментом осуществлялись расчеты АЧХ, когда расчетная схема по определению частотных

характеристик модельного зонда соответствовала расчетным вариантам программы РУДИП, разработанной в Самарском университете [3].

3 Компьютерное моделирование и численное исследование автоколебаний

При относительно малых амплитудах расхода газа основную диссипативную роль играют гидравлические потери по длине волновода и корректирующего элемента, которые учтены в математической модели зондов. Коэффициентов усиления на резонансных частотах на АЧХ модельного зонда увеличивается с ростом среднего давления рабочей среды [6].

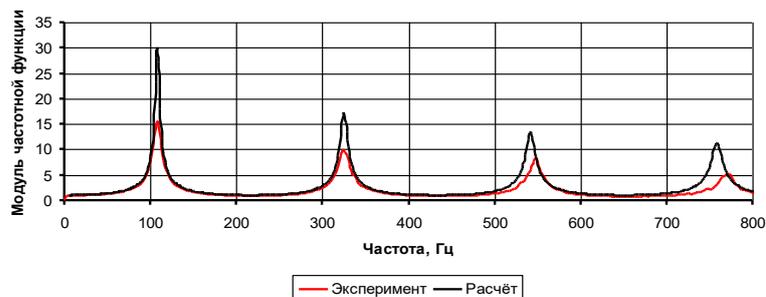


Рисунок 1. АЧХ модельного акустического зонда с параметрами: волновод Дуб из X18H9T длиной $0,79 \text{ м}$, приведённый объем полости датчика давления 100 мм^3 , без корректирующего элемента

Ниже на рисунке 2 приведены экспериментальные и расчетные АЧХ модельного зонда при различных давлениях рабочей среды в случае использования металлических длинных отрезков однородных трубопроводов, не обеспечивающих приемлемое демпфирование резонансных колебаний.

Ниже на рисунке 3 представлена АЧХ модельного зонда с применением в качестве акустической нагрузки единичного однородного металлического трубопровода с диаметром, аналогичным подводящему волноводу и длиной 40 м .

Из приведенных графиков следует, что, чем ниже среднее давление, тем равномернее АЧХ зондов, то есть меньше их динамическая погрешность в заданном

диапазоне частот. Экспериментальные данные качественно подтверждают расчетные зависимости АЧХ зондов без корректирующего элемента и количественно при использовании корректирующих элементов в виде длинных линий. Применение корректирующих элементов в виде длинных линий позволяет скорректировать АЧХ зондов в широком диапазоне изменения среднего давления.

В рамках представленного материала далее приводятся результаты экспериментальных исследований модельного зонда с корректирующими элементами в виде акустических нагрузок, состоящих из последовательно соединенных дюритовых шлангов Дуб, имеющих в большом количестве на испытательных стендах, с длинами $1,8 \text{ м}$ и 10 м , а также

сочетания гибкого шланга длиной 1,8 м и медного трубопровода Ду6 длиной 40 м для уровней среднего давления 4 и 10 кгс/см². Такое сочетание позволяет облегчить

подключение акустической нагрузки в виде металлического трубопровода к модельному акустическому зонду.

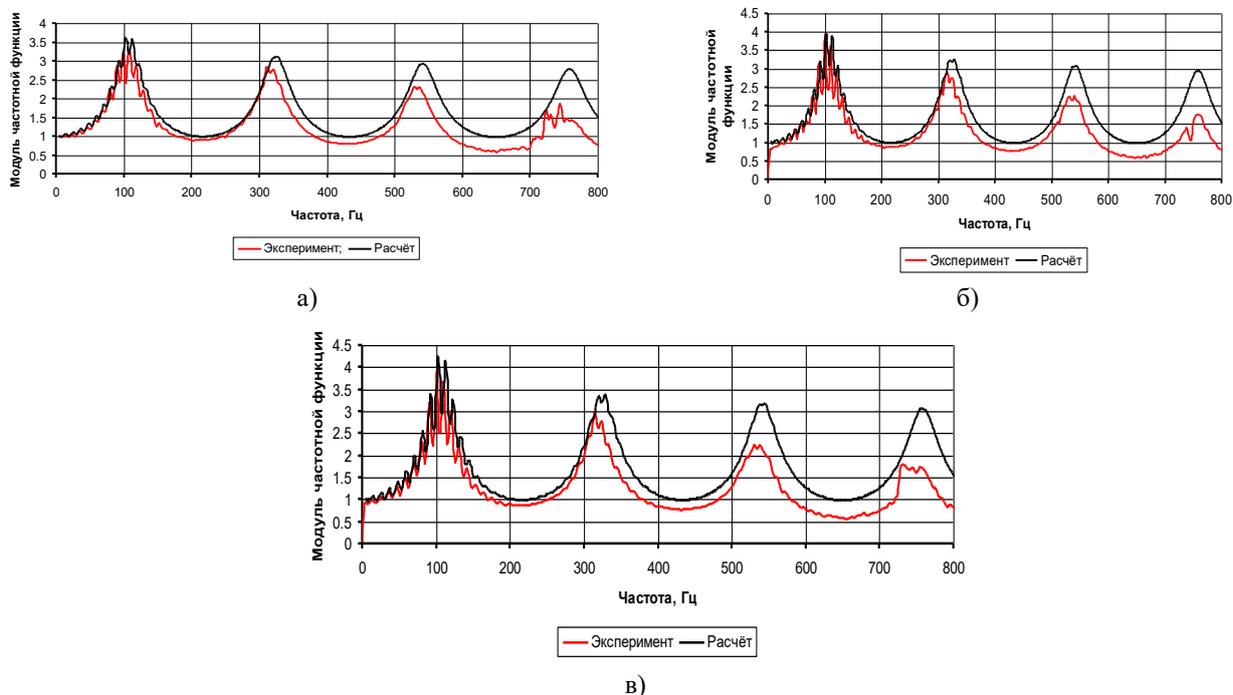


Рисунок 2. АЧХ зонда с волноводом Ду6 длиной 0,79 м с объёмом полости датчика 100 мм³ и корректирующим элементом в виде длинной линии Ду3 длиной 15 м при давлениях 4 кгс/см² - а, 6 кгс/см² - б и 8 кгс/см² - в

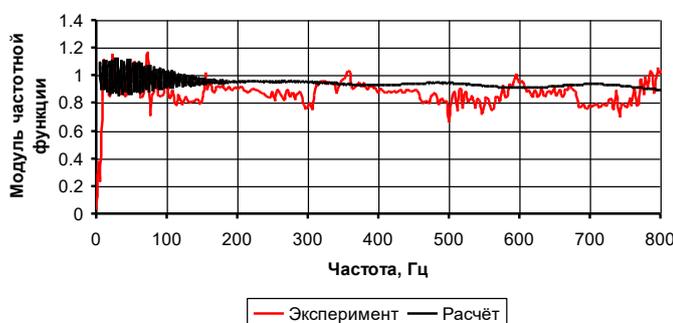
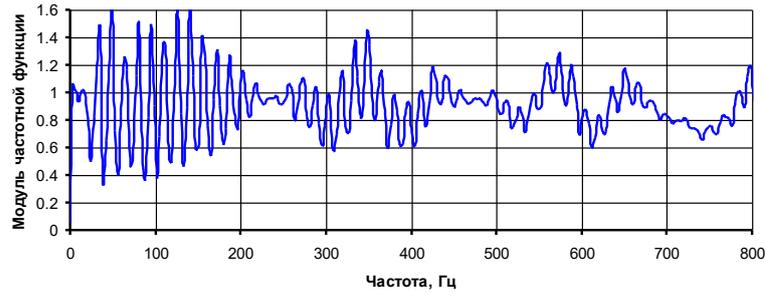


Рисунок 3. АЧХ зонда с волноводом Ду6 длиной 0,79 м с объёмом полости датчика 100 мм³ и корректирующим элементом в виде длинной линии Ду6 длиной 40 м при давлении 6 кгс/см²

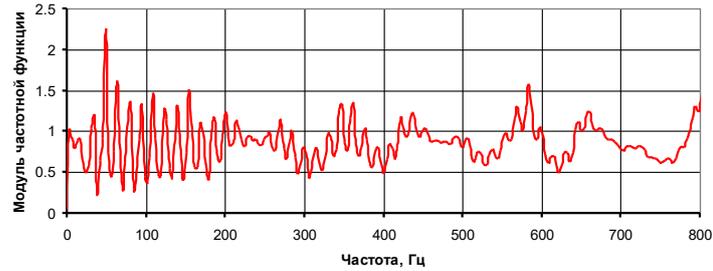
Заслуживают внимания результаты испытаний по определению АЧХ модельного зонда на частотном стенде Самарского университета с указанными выше акустическими нагрузками из гибких шлангов (на рисунке 4 и рисунке 5.).

Из представленных рисунков следует, что АЧХ зонда с корректирующим элементом в виде последовательно соединённых гибких

шлангов Ду6 с длинами 1,8 м и 10 м сопровождается рядом резонансов, зависящих от длин гибких шлангов. Наибольшая неравномерность АЧХ в диапазоне частот от 0 до 800 Гц составляет +100% и минус 80%. Такая неравномерность при измерении пульсаций давления не допустима, поэтому этот вариант коррекции АЧХ зонда не рекомендуется.

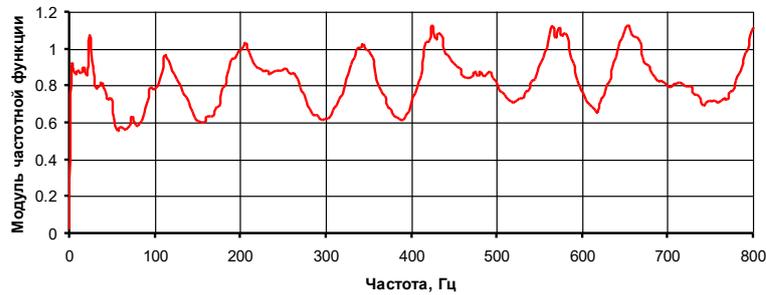


а)

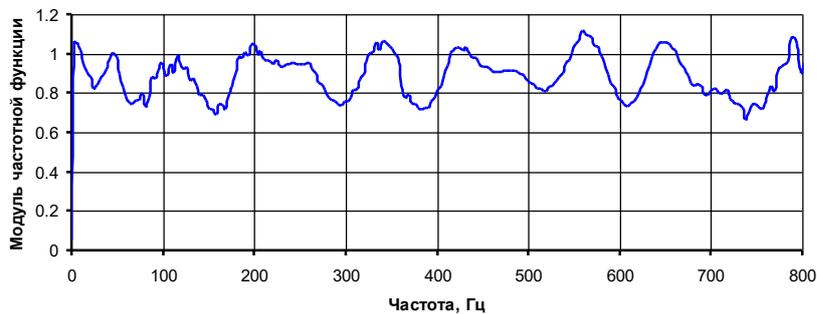


б)

Рисунок 4. Экспериментальные АЧХ модельного акустического зонда с параметрами: волновод Дуб длиной 0,79 м, приведённый объем полости датчика давления 100 мм³, корректирующий элемент в виде последовательно соединенных гибких шлангов Дуб с длинами 1,8 м и 10 м и средних давлениях 4 кгс/см – а, 10 кгс/см² – б



а)



б)

Рисунок 5. Экспериментальная АЧХ акустического зонда с параметрами: волновод Дуб длиной 0,79 м, приведённый объем полости датчика давления 100 мм³, корректирующий элемент в виде последовательно соединенных гибкого шланга Дуб длиной 1,8 м и металлической трубки Дуб длиной 40 м при средних давлениях 4 кгс/см² – а, 10 кгс/см² – б

Применение корректирующего элемента в виде последовательно соединённых гибкого шланга Дуб длиной 1,8 м и медной трубки Дуб длиной 40 м приводит к большему выравниванию АЧХ зонда (рисунок 6), однако в области частот до 50 Гц наибольшая погрешность измерения пульсаций давления может составить до минус (40...50) % при среднем давлении до 8 кгс/см². В диапазоне частот 50...800 Гц при среднем давлении 10 кгс/см² и более погрешность измерения относительно номинального значения 0,9 составляет +20% и минус 10% при среднем давлении 4 кгс/см² и +20% и минус 30% при среднем давлении 10 кгс/см².

4 Заключение

В результате проведенной экспериментальной работы, была показана качественная возможность применения свободных стендовых линий, в том числе состоящих из наборов дюритовых шлангов в качестве согласованных нагрузок для акустических зондов при измерении пульсаций давления в процессе стендовых испытаниях ГТД. Однако следует иметь в виду, что для получения количественных результатов, хотя бы с погрешностью не более 15...20%, потребуется проведение дополнительных исследований.

Некоторые выбросы в экспериментальных частотных характеристиках зондов объясняется нестабильностью возбуждаемых в пульсаторе колебаний давления заданной частоты, так как запись данных с датчиков осуществлялась в режиме набора частоты в течение 60...80 секунд. Другой причиной является снижение уровня сигнала в полости пульсатора с увеличением частоты колебаний.

Проведенные исследования показывают, что применение стендовых трубопроводов для выравнивания АЧХ зондов оправдано для получения только качественных результатов. В зондах с повышенными требованиями по динамической точности

необходимо применять длинные линии без каких-либо стендовых трубопроводов, причём объём полости на входе в датчик должен быть минимально возможным. Кроме того, нужно иметь в виду, что температурная погрешность зонда из-за неравномерного распределения температуры по длине волновода может быть существенной (при обеспечении повышенных требований) и пропорциональной корню из четвёртой степени отношения температур на входе в зонд и у датчика.

Список использованных источников

- [1] 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.
- [2] Устройство для измерения пульсаций давления газа, Гимадиев А. Г., Касьянов С. А., Дягилева Е. С., Быстров Н. Д. / Патент на полезную модель RU 184246 U1, 18.10.2018. Заявка № 2018123844 от 29.06.18.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Patent US 2015/0268121 A1 –Probe for measuring pressure oscilations in the combustor of a gas turbine. Pub. Date: Sep. 24, 2015. Applicant: Alstom Technology Ltd. Inventors: Hanspeter Zinn, Nicolas Noiray, Bruno Schuermans, Danda-Raj Pahari, DejanRajkovic. Assignees: Alstom Technolog Ltd.
- [6] Шорин, В. П. Формирование динамических свойств трубопроводных цепей : монография. - Текст : электронный / Н. Д. Быстров, А. Г. Гимадиев, А. Н. Головин, В. И. Санчуггов, В. Я. Свербилов, Е. В. Шахматов, В. П. Шорин ; под ред. В. П. Шорина ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. - Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2020. – 328 с.: ил. ISBN 978-5-7883-155.

ON USING BENCH MEASURING PIPELINES AS ACOUSTIC LOADS OF PRESSURE PULSATION PROBES

N.D. Bystrov
A.G. Gimadiev

Samara National Research University
34, MOSKOVSKOESHOSSE,
SAMARA,
443086, RUSSIAN FEDERATION

bystrof-nd@ya.ru

When adjusting the gas turbine engine for operating parameters, taking into account pressure pulsations in the gas generator path, acoustic probes are used with the sensor moving out of the high temperature zone. The input waveguide included in the probe is an acoustically resonating element that significantly distorts the measurement result. Among the various corrective elements for acoustic probes, in practice, a special role is given to non-reflective loads in the form of long lines. During bench tests, it is often advisable for manufacturers to use structures made up of durite hoses with short sections of metal pipelines in addition to long lines. The attached material shows the test results of a model probe with several types of such agreed loads. The possibility of such a solution to increase the accuracy of measuring pressure pulsations in conditions of increased temperatures is shown.

Keywords: GTE; air-gas path; pressure pulsations; probe; acoustic loading; long line; frequency characteristic

References

- [1] Investigation of frequency characteristics of acoustic probe for measurement of pressure pulsations in inlet device of gas turbine engine/V.N. Ivanenko, T.G. Alexandrova, E.S. Diaghileva, A.G. Gimadiyev, N.D. Bystrov//Bulletin of Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev (National Research University). 2015. T. 14. № 3-2. Page 491-500.
- [2] Device for measurement of gas pressure pulsations/ Gimadiyev A. G., Kasyanov S. A., Diaghileva E. S., Bystrov N. D./ Patent for utility model RU 184246 U1, 18.10.2018. Application No. 2018123844 dated 29.06.18.
- [3] Shorin, V.P. Acoustic methods and means of measuring pressure pulsations/V.P. Shorin, E.V. Shakhmatov, A.G. Gimadiev, N.D. Bystrov//Samara: Publishing House Samara. state. Aerocosm. un-ta, 2007. – 132 c.
- [4] Furlotov, V. I. Determination of the frequency characteristic of the measuring system "pressure-waveguide oscillation sensor" at increased gas parameters/V. I. Furlotov, A. N. Dubovitsky, G. S. Khanyan//Development of aircraft engine test facilities and methods (Collection of articles). Call. authors - M.: TSIAM, 2010. - 252 s.
- [5] Patent US 2015/0268121 A1 –Probe for measuring pressure oscillations in the combustor of a gas turbine. Pub. Date: Sep. 24, 2015. Applicant: Alstom Technology Ltd. Inventors: Hanspeter Zinn, Nicolas Noiray, Bruno Schuermans, Danda-Raj Pahari, DejanRajkovic. Assignees: Alstom Technolog Ltd.
- [6] Shorin, V.P. Formation of dynamic properties of pipe circuits: monograph. - Text: electronic/N. D. Bystrov, A. G. Gimadiev, A. N. Golovin, V. I. Sanchugov, V. Ya. Sverbilov, E. V. Shakhmatov, V. P. Shorin; edited by V.P. Shorin; Mr. Science and Higher Education Ros. Federation, Samar. nats. researched. - Samara: Publishing House Samara. un-ta, 2020. - 328 p.: il. ISBN 978-5-7883-155.