

## ОБ ИЗМЕРЕНИИ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

©2011 В. П. Шорин<sup>1</sup>, А. Г. Гимадиев<sup>1</sup>, Н. Д. Быстров<sup>1</sup>, С. А. Ильинский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup>ОАО «КУЗНЕЦОВ» (ОАО СНТК имени Н.Д. Кузнецова), г. Самара

Надежная оценка запасов устойчивости компрессора обеспечивается при измерении пульсаций давления в диапазоне частот от нескольких Гц до нескольких кГц. Поскольку датчики пульсаций давления часто не могут располагаться в точках измерения, их подключают к точкам измерения с помощью подводящих каналов. При этом формируется устройство под названием акустический зонд. Предложено применять научно обоснованные методики для расчета их частотных характеристик. Разработаны программные средства, позволяющие осуществлять расчеты частотных характеристик вновь проектируемых акустических зондов с элементами коррекции их частотных характеристик, а также обрабатывать получаемую во время испытаний двигателей с помощью акустических зондов информацию о пульсационном состоянии объектов контроля. Для проведения динамических испытаний с целью экспериментальной отработки зондов для измерения пульсаций на предмет соответствия их частотных характеристик расчетным на кафедре АСЭУ СГАУ создано стендовое оборудование и измерительно-регистрационный комплекс.

*Проточный тракт ГТД, пульсации давления, зонды для измерения пульсаций давления, программные средства для расчета и проектирования зондов, динамические испытания зондов, стенд для частотных испытаний зондов.*

При разработке и доводке газотурбинных двигателей контроль пульсаций давления в проточной части является весьма важным. При превышении допустимого уровня пульсаций давления включаются защитные системы двигателя, изменяющие режим работы двигателя и предотвращающие выход из строя компрессора и двигателя в целом.

При доводке двухконтурных двигателей на расчетные параметры контролируются пульсации давления потока как в первом, так и во втором контурах двигателя. Особенно тщательно изучается влияние неравномерности потока на входе в двигатель, что требует значительного числа точек контроля пульсаций полного давления. Оцениваются пульсации давления за компрессорами низкого и высокого давления (КНД и КВД), контролируются пульсации в камере сгорания, а в отдельных случаях для форсированных двигателей - в форсажной камере сгорания.

В связи с использованием альтернативных источников энергии (например, природный сжиженный газ) в авиации и для двигателей наземного применения появилась проблема вибрационного горения топ-

лива в камере сгорания, которая не может быть решена без измерения пульсаций давления. Вибрационное горение топлива в КС само по себе является чрезвычайно опасным режимом, поскольку энергия колебаний потока может стать настолько высокой, что вызывает появление возбуждающих сил, способных в ряде случаев вызвать разрушение элементов двигателя.

Данные по требуемой точности контроля и измерения пульсаций давления на отечественных испытательных стендах ГТД приводятся в ОСТ 1.01-021-93 и составляют  $\pm 10\%$  по амплитуде. Достигнутый к настоящему времени уровень точности при измерении пульсаций давления составляет около  $\pm 20\%$ .

В настоящее время перед конструкторами ставится ряд ответственных задач по созданию конкурентоспособных газотурбинных двигателей как авиационного, так и наземного применения. Одной из проблем, вытекающей из названной задачи, является измерение и контроль пульсаций давления потока воздуха или рабочего тела в отдельных сечениях двигателя.

Сбор информации о пульсационном состоянии потока на входе в двигатель позволяет получать энергетические спектры пульсаций давления, среднеквадратичные значения пульсационной составляющей давления и их автокорреляционные функции. В ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова при доводке двигателя НК-32 получены энергетические спектры пульсаций давления и силового отклика в узлах крепления двигателя на ЛА в условиях различного уровня возмущений на входе в двигатель. Указанные энергетические спектры весьма типичны для ГТД, но при этом они в случае, рассмотренном в работе [1], отражают специфику крупноразмерного двигателя, т.е. сосредоточение энергии колебаний воздушного потока в низкочастотной области.

Оценка запасов устойчивости компрессора двигателя на испытательных станциях и открытых стендах проводится измерением пульсаций давления в диапазоне частот от нескольких Гц до нескольких кГц. Измерение пульсаций давления проводится в некоторых случаях и при более высоких частотах, например при оценке формирования вредных выбросов в основных и форсажных камерах сгорания ГТД [1].

Поскольку условия работы первичных преобразователей пульсаций давления в точках измерения на объектах контроля зачастую не соответствуют допустимым из-за высоких температур, высокого уровня вибраций, наличия взвешенных частиц в продуктах сгорания и т.п., а также в связи с тем, что в ряде случаев первичный преобразователь конструктивно не может быть установлен непосредственно в точке измерения, производится подключение датчика к точке измерения при помощи подводящего канала с датчиком или акустического зонда (рис. 1).

Наличие подводящего канала приводит к значительному искажению передаваемой к датчику информации о переменной составляющей давления. Поэтому при создании акустических зондов предложено применять научно обоснованные методики расчета их частотных характеристик [2].

На основе предложенных методик разработаны программные средства, позволяющие осуществлять расчеты частотных характеристик вновь проектируемых аку-

стических зондов с элементами коррекции частотных характеристик, а также обрабатывать получаемую с их помощью информацию о пульсационном состоянии испытуемых двигателей.



Рис. 1. Внешний вид акустических зондов

К таким программам относятся: «Расчет устройств для измерения пульсаций» (РУДИП) и «Программа обработки и восстановления сигналов» (ПОВС) (рис. 2).

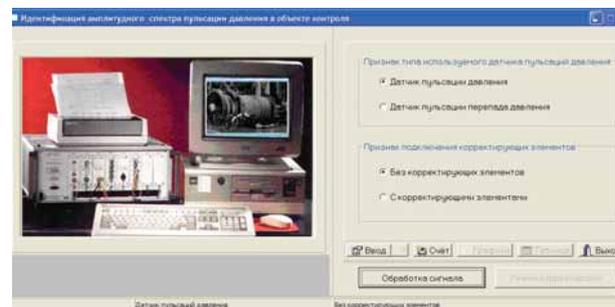


Рис. 2. Основная форма программы ПОВС

Программа позволяет осуществлять расчеты частотных характеристик акустических зондов, обрабатывать измеренные с помощью зондов временные реализации пульсаций давления, вносить корректировку в полученные временные реализации. Программный комплекс позволяет рассчитывать частотные характеристики акустических зондов как с датчиками абсолютного давления, так и для зондов с дифференциальными датчиками. Характерной особенностью программного комплекса является возможность осуществления расчетных действий в случае

применения так называемых неоднородных трубопроводов, подводящих к датчику сигнал давления. Причем предусмотрены случаи неоднородности как по температуре, так и по геометрии. В качестве примера на рис. 3 представлена исходная форма генерации расчетного задания в программном комплексе.

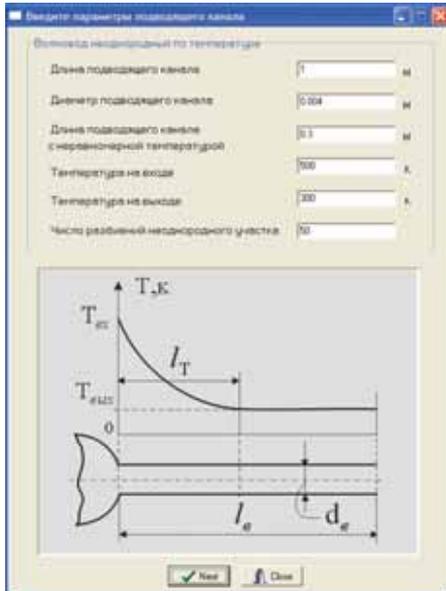


Рис. 3. Исходная форма для формирования расчетного задания в случае неоднородности подводящего трубопровода проектируемого или эксплуатируемого акустического зонда

Для корректировки амплитудно-частотных характеристик акустических зондов предложен ряд схем корректирующих элементов. В качестве примера на рис. 4 представлено одно из окон программного комплекса для расчета АЧХ акустического зонда с применением корректирующего элемента в виде длинной линии.

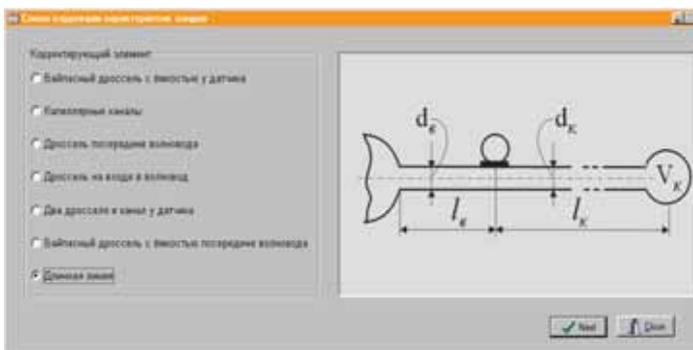


Рис. 4. Окно программы для расчета частотных характеристик зонда

Результаты расчетов выводятся в виде графиков (рис. 5) или таблиц.



Рис. 5. АЧХ акустического зонда с корректирующими элементами. Исходные расчетные данные приводятся в верхней части графика.

Для обработки записанных временных реализаций пульсаций давления в результате испытаний объектов, в рамках программного комплекса, предусмотрена специальная форма (рис. 6).

Для проверки адекватности разработанных математических моделей акустических зондов и эффективности их корректирующих элементов проводятся стендовые частотные испытания, максимально приближенные к натурным. Такие же испытания зондов проводятся и перед непосредственным применением на ГТД при его доводке в стендовых условиях. Для этого на кафедре АСЭУ СГАУ создано стендовое оборудование и измерительно-регистрационный комплекс, позволяющие проводить частотные испытания зондов при значениях средних давлений, характерных для ГТД.

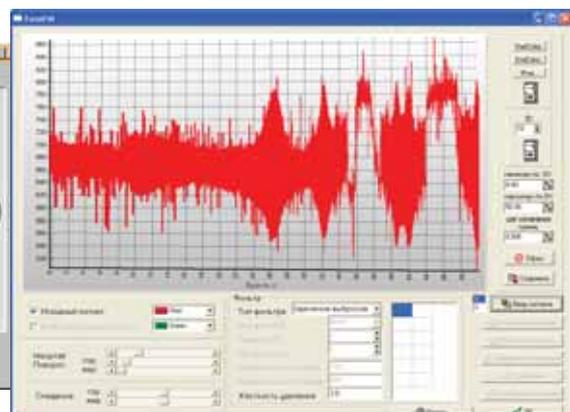


Рис. 6. Форма, предназначенная для обработки сигналов в программе ПОВС



*Рис. 7. Узел испытательной камеры стенда с датчиком и опытным акустическим зондом*

Оборудование для динамических испытаний зондов состоит из пневматического стенда и регистрационного комплекса (рис. 7).

Таким образом, созданные методики, программные средства и испытательное

оборудование позволяют проектировать и динамически испытывать акустические зонды для измерения пульсаций давления в проточной части ГТД.

### **Библиографический список**

1. Климнюк, Ю.И. Оптимизация конструкций компрессоров авиационных ГТД с учетом воздействия эксплуатационных неоднородностей воздушного потока [Текст] / Ю.И. Климнюк. - Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2001. - 249 с.

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

## **ABOUT THE PROBES FOR MEASURING PULSATIONS OF PRESSURE IN THE FLOWING PART GAS TURBINE ENGINES**

©2011 V. P. Shorin<sup>1</sup>, A. G. Gimadiev<sup>1</sup>, N. D. Bystrov<sup>1</sup>, S. A. Ilinskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

<sup>2</sup>JSC «KUZNETSOV», Samara

Evaluation of the stability of GTE compressor is provided in the measurement of pressure fluctuations in the frequency range from several Hz to several kHz. Because the sensors of the pressure fluctuations can not be located at the measurement points due to excessive heat, vibration and limited space for their installation used the lead-in channels - acoustic probes. Proposed science-based methodology for calculating the frequency characteristics of the probes with corrective elements on which the developed software tools to select their parameters. The developed software can process the information derived using acoustic probes during engine tests. To verify the validity of computational models of probes at the Department of SNPP SGAU established test facilities and measurement and registration set in place to test their frequency.

*Duct GTE, pulse of pressure, sensors for measuring pressure fluctuations, software tools for analysis and design of the probes, the dynamic test probes, test stand for the frequency of probes.*

### **Информация об авторах**

**Шорин Владимир Павлович**, академик РАН, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 335-19-05. E-mail: [iam@ssau.ru](mailto:iam@ssau.ru). Область научных интересов: разработка конструктивных методов управления динамическими свойствами гидрогазовых систем.

**Гимадиев Асгат Гатъятович**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический

университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 335-19-05. E-mail: [iam@ssau.ru](mailto:iam@ssau.ru). Область научных интересов: коррекция динамических характеристик систем управления и контроля параметров двигателей летательных аппаратов и других энергетических и технологических 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). Тел.: (846) 335-19-05. E-mail: [iam@ssau.ru](mailto:iam@ssau.ru). Область научных интересов: коррекция динамических характеристик систем измерения давления при испытаниях ГТД.

**Ильинский Станислав Алексеевич**, начальник отдела ОАО «КУЗНЕЦОВ» Тел. (846) 950-71-36. Область научных интересов: коррекция динамических характеристик систем измерения давления при испытаниях ГТД.

**Shorin Vladimir Pavlovich**, academician, doctor of technical sciences, the professor of Samara state aerospace university named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 335-19-05. E-mail: [iam@ssau.ru](mailto:iam@ssau.ru). Area of research: development construction management dynamic properties of the of hydro and gas systems.

**Gimadiev Asgat Gatjatovich**, the professor of Samara state aerospace university named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 335-19-05. E-mail: [iam@ssau.ru](mailto:iam@ssau.ru). Area of research: correction of dynamic characteristics of systems of measurement of pressure at tests GTD.

**Bystrov Nikolay Dmitrievich**, the professor of Samara State Aerospace university named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 335-19-05. E-mail: [iam@ssau.ru](mailto:iam@ssau.ru). Area of research: correction of dynamic characteristics of systems of measurement of pressure at tests GTD.

**Ilinsky Stanislav Alekseevich**, the chief of a department of Open Society SNTK of a name of academician N.D. Kuznetsov. Phone: (846) 998-58-36. E-mail: [sntk@sntk.saminfo.ru](mailto:sntk@sntk.saminfo.ru). Area of research: correction of dynamic characteristics of systems of measurement of pressure at tests GTD.