

УДК 621.45.01

В.Ю. БЕРЕЖНОЙ<sup>1</sup>, М.М. КУДИН<sup>2</sup>, О.Д. ДЕГТЯРЁВ<sup>2</sup><sup>1</sup>ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Украина<sup>2</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## ДИАГНОСТИКА ПУЛЬСАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ СОВРЕМЕННЫМИ СРЕДСТВАМИ ИЗМЕРЕНИЯ

Произведено экспериментальное сравнение пригодности двух типов малоинерционных датчиков давления для контроля пульсационного горения в низкоэмиссионной противоточной камере сгорания газотурбинного двигателя. Приведены результаты спектрального анализа сигналов тензометрического и пьезоэлектрического датчиков при плавном наборе мощности двигателя.

**газотурбинный двигатель, камера сгорания, пульсационное горение, малоинерционный датчик давления, спектральный анализ**

### Введение

При доводке газотурбинных двигателей (ГТД) с низкоэмиссионными камерами сгорания специалисты часто сталкиваются с пульсационным горением.

Распространенным способом предотвращения разрушения камеры сгорания (КС), вызванного этим явлением, является контроль уровня пульсаций давления воздуха в КС. При этом надежность работы первичных средств измерения (датчиков), работающих в тяжелых вибрационных и температурных условиях, часто остается недостаточной.

В данной статье представлены результаты совместных испытаний малоинерционных датчиков давления тензометрических датчиков МТРП производства ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» [1] и пьезокерамических датчиков СР103, СР235 производства Vibro-meter (Швейцария) [2] на работающем двигателе.

### Формулирование проблемы

При доводке двигателей с низкоэмиссионными камерами сгорания производства ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» (г. Николаев) возникли трудности в получении достоверной информации об уровне динамической составляющей давления воздуха в камере сгорания (пульсаций давления).

Впервые на предприятии пульсационное горение в камере сгорания было обнаружено при выполнении требования заказчика по минимальным выбросам NOx и CO. При непродолжительной работе КС на экологическом режиме появлялись дефекты конструкции КС.

Для контроля величины пульсаций давления вначале использовались датчики ЛХ610. Главный недостаток этого датчика - его низкая рабочая температура (не более 523 К). Датчик приходилось охлаждать технологическим воздухом, что давало дополнительную шумовую составляющую к общему уровню сигнала.

Датчик собственного производства, выполненный на основе мембранного тензорезисторного преобразователя (МТРП), давал достоверные показания, не требовал охлаждения, но не обладал достаточным ресурсом работы. Разработка датчика пульсаций давления для КС ГТД, работоспособного при температурах до 823 К и уровне вибрационной перегрузки до 500g оказалась сложной и дорогостоящей технической задачей.

Поскольку качество диагностики пульсационного горения в КС ГТД напрямую в значительной степени зависит от свойств первичных преобразователей, возникла проблема их выбора.

### Решение проблемы

Для решения данной проблемы были выбраны и опробованы датчики различной конструкции, среди которых были МТПП производства ГП НПКГ "Зоря-Машпроект" и СР103, СР235 производства Vibrometer (Швейцария). В результате испытаний на двигателе было установлено, что лучшими эксплуатационными свойствами в условиях КС ГТД обладает пьезоэлектрический датчик СР103. Его основные технические характеристики приведены в табл. 1. На рис. 1 даны его температурная и частотная характеристики.

Таблица 1  
Характеристики датчика СР103

Диапазон измерений, Па	4-2000000
Максимально допустимая перегрузка, МПа	25
Линейность в диапазоне измерений, %	± 1
Чувствительность к виброускорению не более, Па/g	21
Резонансная частота, кГц	50
Неравномерность частотной характеристики в диапазоне 2Гц-10кГц, %	± 5
Диапазон рабочих температур, К	77 – 923
Перегрузка при ударе	до 2000 g

Датчик имеет взрывобезопасное исполнение, динамически откалиброван при производстве и не требует периодической калибровки в эксплуатации.

Работоспособность этого датчика была проверена при натурных испытаниях двигателей различной мощности, а также при длительной работе в условиях эксплуатации двигателей в энергетической и газоперекачивающей промышленности.

Измерительный канал пульсаций давления включает в себя датчик СР103, усилителя ІРС704, блок гальванической развязки GSI 124 и электронный блок VM600. Характеристики узлов измерительного канала представлены в табл. 2. Канал существенно ослабляет электрические помехи, которые могут повлиять на результаты измерения пульсаций давления воздуха в КС.

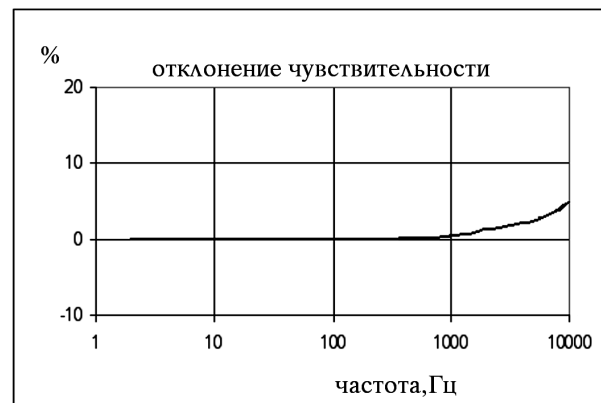
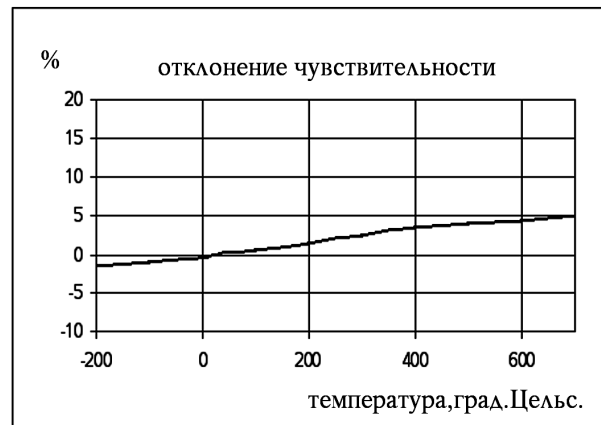


Рис. 1. Температурная и частотная характеристика датчика СР103

Таблица 2  
Погрешности измерительного канала

Вид погрешности	Погрешность, %
<i>Датчик давления СР103</i>	
Нелинейность	±1
Неравномерность частотной характеристики в полосе 120-1200 Гц	±1
Изменение чувствительности при температуре 500 °С	4
<i>Усилитель сигнала ІРС704</i>	
Нелинейность	0,2
<i>Блок гальванической развязки GSI122/GSI124</i>	
Нелинейность	±0,2
<i>Плата обработки сигнала МРС4</i>	
Нелинейность	±1
<i>Выход 4-20 мА платы входов/выходов ІОС4Т</i>	
Нелинейность	±0,5
<b>Суммарная погрешность канала</b>	<b>4.397</b>

Как видно из таблицы, максимальная погрешность измерительного канала не превышает 4,4%, что приемлемо для научно-исследовательских работ и промышленного мониторинга уровней пульсации.

Основные технические характеристики пьезоэлектрического датчика динамического давления СР235, представлены в табл. 3 и на рис. 2.

Таблица 3  
Характеристики датчика СР235

Диапазон измерений, Па	5-5000000
Максимально допустимая перегрузка, МПа	10
Линейность в диапазоне измерений, %	± 1
Чувствительность к виброускорению не более, Па/g	20
Резонансная частота, кГц	55
Неравномерность частотной характеристики в диапазоне 2Гц-10кГц, %	± 5
Рабочая температура, К	218 – 793
Перегрузка при ударе	до 1000g



Рис. 2. Температурная и частотная характеристика датчика СР235

Как видно из рисунка, температурная характери-

стика этого датчика хуже соответствует условиям испытания.

Для проведения сравнительных испытаний в условиях работающего двигателя, на наружном кожухе трубчато-кольцевой КС было установлены два датчика СР103, один датчик СР235 и три датчика МТРП вблизи от датчиков СР. Схема установки датчиков на двигателе приведена на рис. 3.

Определение работоспособности датчиков проводилось при испытании двигателя на стационарных и переходных режимах. В данной статье приводятся результаты, полученные при плавном увеличении мощности от 1 МВт до 20 МВт за время 500 секунд.

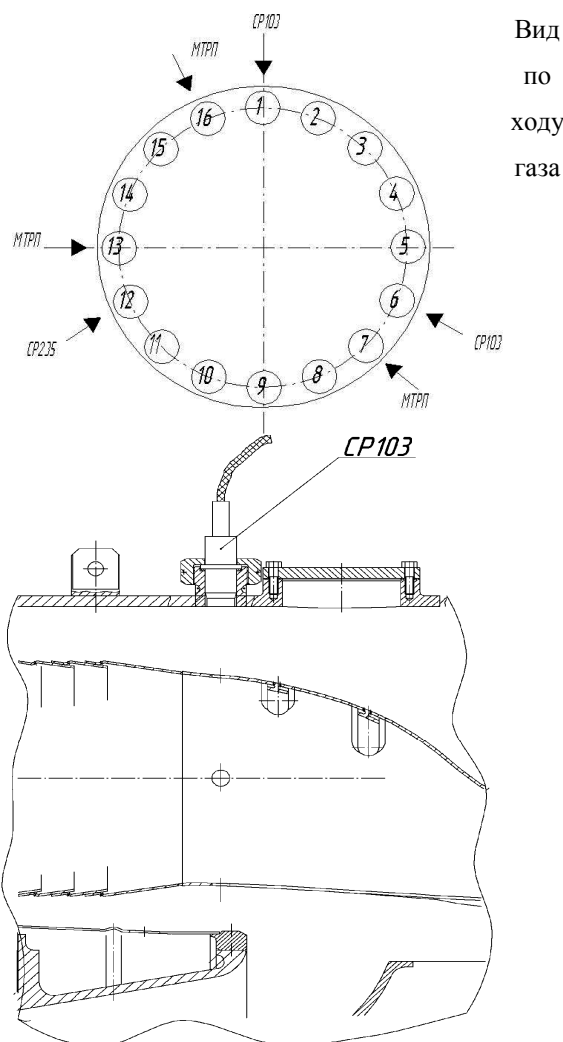


Рис. 3. Схема установки датчиков на двигателе

Обработка сигналов для всех датчиков производилась в частотном диапазоне 30 – 1200 Гц, пред-

ставляющем наибольший интерес для исследования пульсационного горения. Основным признаком пульсационного горения является увеличение среднего квадратического значения (СКЗ) пульсаций давления газа в КС. Записи этой величины при плавном наборе мощности двигателя показаны на рис. 4 – 6.

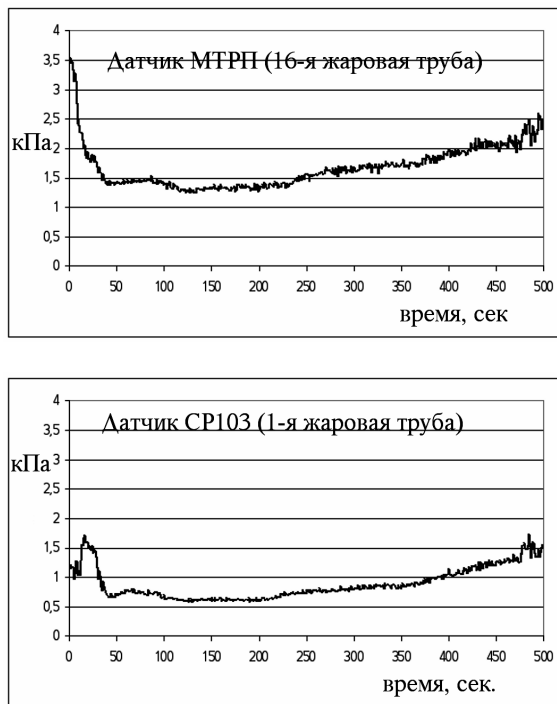


Рис. 4. СКЗ пульсаций давления газа в КС

Из рисунков видно, что датчики МТРП и СР приблизительно одинаково качественно отражают изменение среднего уровня пульсаций на промежуточных режимах (50 – 450 сек.), однако датчики СР в среднем показывают меньшее СКЗ пульсаций, чем датчики МТРП, что может быть вызвано различиями калибровки. Однако в зонах наибольшего интереса, там где пульсации наиболее сильны, датчики показали нерегулярные расхождения, которые нельзя объяснить из рис. 4 – 6. Возможные причины расхождений – различные условия горения в отдельных жаровых трубах, особенности монтажа отдельных датчиков и различия динамических характеристик самих датчиков (МТРП и СР).



Рис. 5. СКЗ пульсаций давления газа в КС

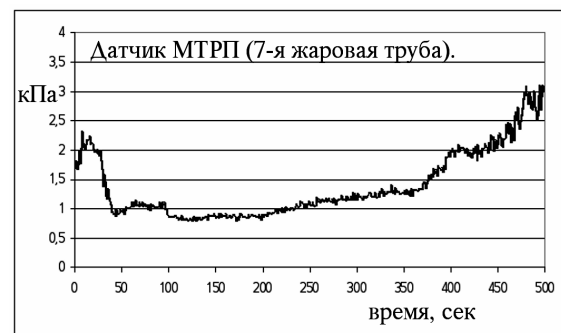


Рис. 6. СКЗ пульсаций давления газа в КС

Для более подробного изучения свойств сигнала и различий в показаниях датчиков был произведен его спектральный анализ на 5-й, 250-й и 490-й секунде набора мощности. Результаты этого анализа приведены на рис. 7 – 15. По оси ординат отложены СКЗ пульсаций давления газа в КС.

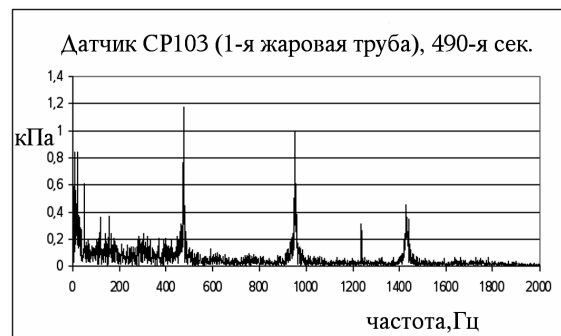
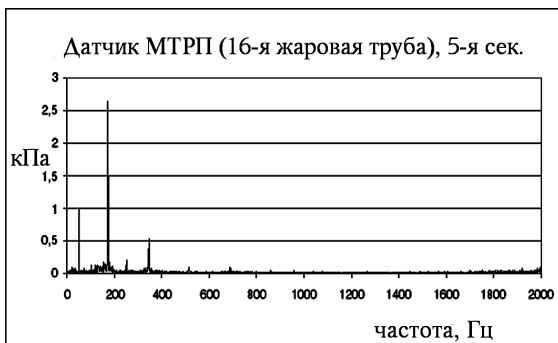
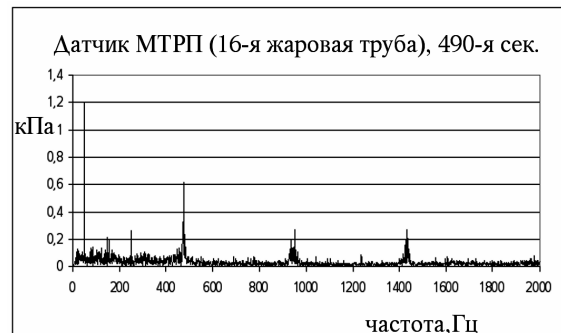
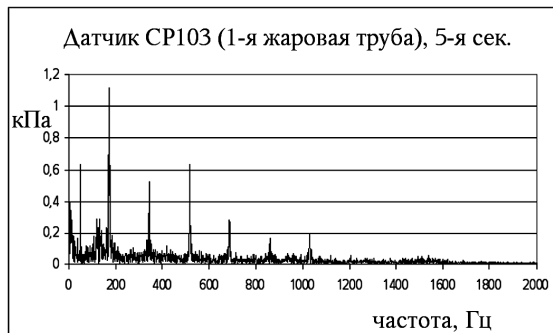


Рис. 7. Спектры пульсаций давления газа в КС

Рис. 9. Спектры пульсаций давления газа в КС

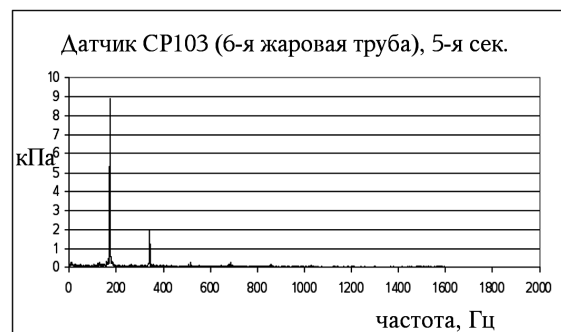
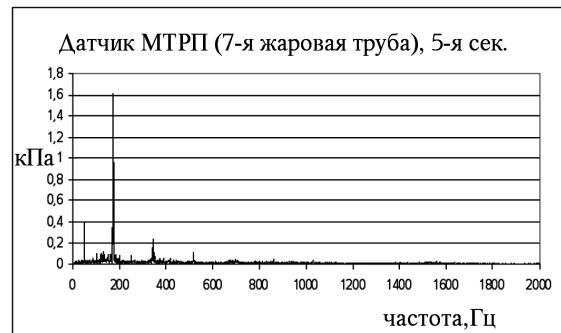


Рис. 8. Спектры пульсаций давления газа в КС

Рис. 10. Спектры пульсаций давления газа в КС

Двигатель работал на генератор, поэтому на всех режимах присутствовала частота 50 Гц со своими гармониками. По ее величине можно сделать вывод о большей помехозащищенности канала датчиков СР. В сигналах наблюдаются составляющие пульсаций давления и их гармоника, а также шум, характерный для турбулентного движения воздуха.

Из рисунков видно, что датчики СР обладают большей чувствительностью, дают больше гармоник и тонких деталей спектра, поэтому, если учесть к тому же их лучшие эксплуатационные характеристики, то они больше подходят для построения диагностических систем.

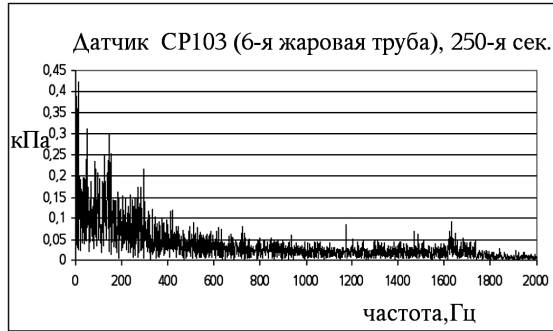
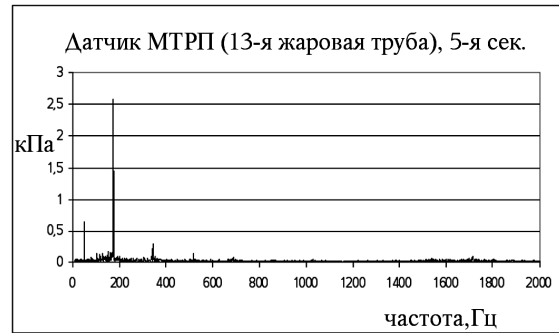
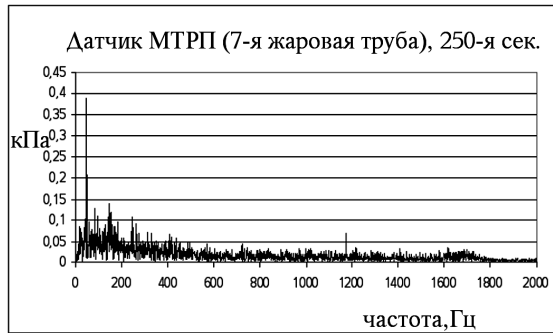


Рис. 11. Спектры пульсаций давления газа в КС

Рис. 13. Спектры пульсаций давления газа в КС

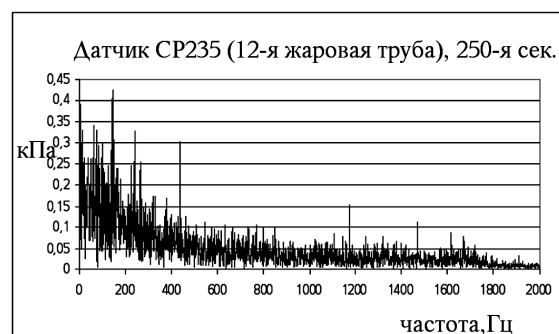
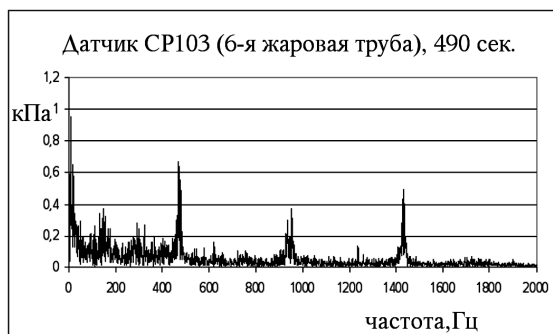
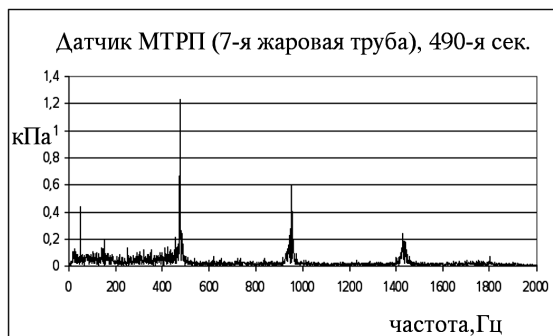


Рис. 12. Спектры пульсаций давления газа в КС

Рис. 14. Спектры пульсаций давления газа в КС

Пульсации давления газа, судя по изменению их фундаментальной частоты на разных режимах по мощности, инициируются газодинамическими возмущениями за компрессором. Для датчиков МТРП наблюдаются две-три гармоники, для датчиков СР – три-четыре.

С точки зрения диагностики возникновения дефектов КС более важными являются пульсации при максимальной мощности, когда давление в камере выше.

В табл. 4 приведены величины СКЗ пульсаций давления газа в КС на фундаментальной частоте.

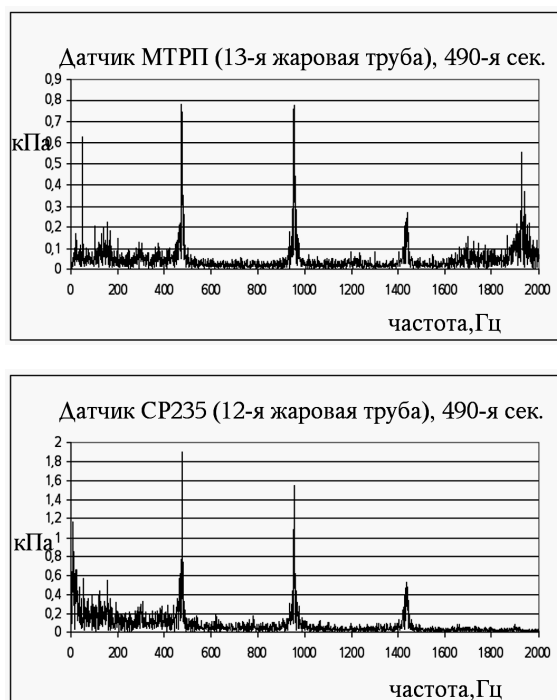


Рис. 15. Спектры пульсаций давления газа в КС

Таблица 4

СКЗ пульсаций давления, кПа

№ жаровой трубы	Тип датчика	режимы		
		5-я сек. частота 172Гц	250-я сек.	490-я сек. частота 477Гц
1	CP103	1,1	–	1,2
16	МТРП	2,7	–	0,6
6	CP103	9	–	1,2
7	МТРП	1,7	–	0,65
12	CP235	7,2	–	1,9
13	МТРП	2,5	–	0,78

Для построения диагностической микропроцессорной системы удобно использовать как среднее квадратическое значение пульсаций давления, так и его значения на фундаментальной частоте и гармониках. Для каждого типа двигателя предельные значения этих величин можно определить в зависимости от напряженного состояния элементов конструкции КС. Так как среднее время наработки на отказ измерительного канала с датчиками CP103, CP235 в условиях КС ГТД составляет 93000 часов, то такая система будет непрерывно отслеживать

возникновение пульсационного горения на протяжении всего срока эксплуатации двигателя.

### Заключение

Сравнительные испытания на реальном двигателе показали, что малоинерционные пьезоэлектрические датчики давления CP103 и CP235 более надежны в эксплуатации, более чувствительны, имеют лучшие динамические свойства, чем тензометрический датчик МТРП. Применение датчиков CP103 и CP235 в составе микропроцессорных диагностических систем позволит надежно контролировать уровень пульсаций давления воздуха в низкоэмиссионных камерах сгорания в течение всего ресурса ГТД.

При этом для построения диагностических признаков удобно использовать средние квадратические значения пульсаций давления газа в камере сгорания и их спектральные составляющие.

### Литература

1. Преобразователь мембранный тензорезисторный давления МТРП. Паспорт 10306.П010ПС. – Николаев, ЦНИОКР «Машпроект», 2004. – 30 с.
2. Piezoelectric pressure transducer type CP103, model P/N143-103-000-931. EC Type Examination Certificate number: LCIE02ATEX6107X – Vibrometer. – Frioburg, Switzerland, 2002. – 47 с.
3. Определение источника повышенных пульсаций давления на входе в камеру сгорания газотурбинного двигателя / А.А. Филоненко, В.Ю. Березной, О.Д. Дегтярев, М.М. Кудин // Авиационно-космическая техника и технология: Научн.-техн. журн. – 2006. – № 7 (33). – С. 98-101.

Поступила в редакцию 4.06.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.П. Герасименко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.