



УДК 621.438:536.461

А.А. МАЛЬКОВ, аспирант

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), г. Санкт-Петербург, РФ

## ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕМПЕРАТУР И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Описана методика диагностики камеры сгорания газотурбинного двигателя газоперекачивающего агрегата по измеренным значениям концентраций оксида углерода, оксидов азота и температур отходящих газов в выхлопной шахте. Показана, что обработка полученных экспериментальных результатов методами математической статистики и определение стандартных отклонений по оксиду углерода ( $S_{CO}$ ), оксидам азота ( $S_{NO_x}$ ) и температуре ( $S_{T_p}$ ) от эталонных величин позволяет проводить диагностику двигателя с достаточной надежностью.

**Ключевые слова:** диагностика, газотурбинные установки, камера сгорания, выбросы, оксид углерода, оксид азота, методы математической статистики, надежность эксплуатации.

В настоящее время существует большое количество методов и способов диагностирования камер сгораний (КС) газотурбинных установок (ГТУ) с применением вибрационного контроля состояния. Основным отличием вибрации, возбужденной в КС, является отсутствие строгой кратности к частоте первой роторной гармоники [1], изменение концентрации оксидов азота в выхлопных газах [2], изменение сигналов ЭДС индукции, возникающей при взаимодействии электропроводной компоненты высокотемпературного газового потока с чувствительным элементом магнитного зонда, размещенного на поверхности корпуса ГТУ в зоне, прилегающей к КС [3]. Интересен способ, в котором диагностирование и прогнозирование неисправностей двигателя осуществляют проведением статистического анализа зарегистрированных пульсаций электростатического излучения ионов, электронов, заряженных частиц [4]. Существующие способы обладают определенными недостатками, к которым в первую очередь следует отнести высокую стоимость, необходимость установки дополнительного оборудования и высокой квалификации специалистов по диагностике.

Согласно теории горения, при фиксированных внешних условиях процесс горения может протекать либо в стационарном режиме, когда основные характеристики – скорость реакции горения, мощность тепловыделения, температура газа и состав продуктов – не изменяются во времени, либо в периодическом, когда эти характеристики колеблются в пределах своих средних значений. Вследствие существенной зависимости скорости реак-

ции от температуры горение отличается высокой чувствительностью к внешним условиям [4]. Нелинейная теория разрушения нержавеющей сталей, работающих при повышенных температурах, показывает, что одной из причин их разрушения являются термофлуктуации [5]. Чем более стабильный процесс в камере сгорания, тем меньшим разрушения она подвергается, а судить о стабильности горения можно по стабильности концентраций продуктов сгорания и стабильности температуры. Так как в процессе эксплуатации ГТУ стабильные внешние условия и установившийся режим работы ГТУ могут существовать относительно небольшой промежуток времени (20–30 минут) [6], то проведение многократных измерений (реально 5 измерений) концентраций продуктов сгорания и температуры должно укладываться в этот временной интервал.

Концентрации оксида углерода и оксидов азота для анализа стабильности продуктов сгорания выбраны как наиболее быстро меняющиеся составляющие выхлопных газов, сильно зависящие от температуры в камере сгорания, а также от изменений в ней.

Мерой стабильности горения может служить рассеяние измеренных параметров относительно их среднего значения, например, дисперсия или стандартное отклонение единичного определения (СКО) [7].

Стабильность температуры в камере сгорания идентична стабильности температуры в выхлопной шахте. При установившемся потоке выхлопных газов и стабильности внешних параметров наблюдается стабильность

тепловых потерь при движении газового потока от камеры сгорания до точки пробоотбора на выхлопной шахте.

В качестве параметра для анализа стабильности выбрано стандартное отклонение единичных результатов измерений ( $S$ ) и стандартное отклонение среднего результата  $n$  результатов измерений  $\bar{x}$ , которое равно  $S/\sqrt{n}$ . Используя эти величины, можно рассчитать доверительный интервал, характеризующий диапазон возможных значений измеряемой величины с выбранной доверительной вероятностью. Для доверительной вероятности  $p = 0,95$  этот интервал вычисляется как произведение стандартного отклонения среднего значения измеряемой величины ( $S/\sqrt{n}$ ) и квантиля распределения Стьюдента для числа степеней свободы  $n-1$  и двухсторонней доверительной вероятности  $p = 0,95$  ( $t_p$ ).

Например, если для пяти измерений температуры газа в выхлопной шахте и в камере сгорания  $S_T = 1$ , интервал колебаний температуры газа около среднего значения составит

$$\pm \frac{St_p}{\sqrt{n}} = \pm \frac{1,2,776}{\sqrt{5}} = \pm 1,24 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Автором предлагается простая, достаточно надежная и не требующая установки дополнительного оборудования диагностика КС ГТУ на установившемся режиме работы газоперекачивающего агрегата (ГПА). Диагностика состоит в том, что в течение 20 минут 5 раз измеряют переносным газоанализатором типа Testo-350 концентрации оксида углерода, оксидов азота и температуру газов в выхлопной шахте [8], проводят обработку результатов измерений с помощью методов математической статистики – определяют стандартные отклонения по оксиду углерода ( $S_{CO}$ ), оксидам азота ( $S_{NOx}$ ) и температуре ( $S_{T^o}$ ) и делают выводы о состоянии камеры сгорания по отклонению этих результатов от эталонных ве-

личин. В качестве эталонной величины для сравнения выбирают значения стандартных отклонений температуры газов и концентраций оксидов азота и оксида углерода, которые определяют по результатам аналогичных измерений и расчетов этих величин для каждого типа двигателей от начала его эксплуатации до завершения. По мере накопления статистических данных эталонные величины корректируются.

Практическое применение диагностики КС ГТУ газоперекачивающих агрегатов проводилось для ГПА типа Solar и ГПА-16 «Урал». Данные по стандартным отклонениям контролируемых параметров в зависимости от режимов работы и времени наработки ГПА, обсуждение результатов и выбор эталонных величин представлены ниже.

### ГПА типа Solar со стационарным двигателем Таурус-60С

В течение года были проведены измерения вредных выбросов от ГПА типа Solar со стационарным двигателем Таурус-60С на разных режимах работы осевого компрессора. Первые измерения проводились после проведения регламентных работ по техническому обслуживанию (РТО). Результаты расчетов стандартных отклонений по оксиду углерода ( $S_{CO}$ ), оксидам азота ( $S_{NOx}$ ) и температуре ( $S_{T^o}$ ) в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов осевого компрессора в процентах от номинального значения ( $n_{ок}$ , %) для ГПА №№ 1, 2, 3 представлены в табл. 1–3.

Анализ стандартных отклонений для ГПА № 1 показывает, что после 23200 час наработки двигателя значения всех стандартных отклонений на всех режимах работы двигателя меньше 1,0. После наработки 25300 час на режимах  $n_{ок}$  более 95 % стандартные отклонения по температуре выхлопных газов становятся более 1,0. Нарботка двигателя в 26800 час приводит к появлению значений стандартных отклонений по оксидам азота, ок-

**Таблица 1 – Значения стандартных отклонений по оксиду углерода ( $S_{CO}$ ), оксидам азота ( $S_{NOx}$ ) и температуре  $S_{T^o}$  в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов осевого компрессора для ГПА Solar № 1**

Обороты осевого компрессора, $n_{ок}$ , %	Нарботка двигателя, час											
	23200			25300			26800			27700		
	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^o}$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^o}$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^o}$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^o}$
90	0,78	0,73	0,63	0,34	0,87	1,00	0,82	0,48	1,00	0,83	0,49	0,79
91				0,64	0,28	0,95	0,53	0,90	1,06			
92				0,48	0,62	0,64	0,96	0,37	0,60			
93				0,87	0,90	0,73	0,82	0,69	0,78			
94				0,46	0,37	0,81	0,90	0,43	0,86			
95	0,56	0,92	0,84	0,45	0,68	1,10	0,88	0,73	1,21	0,95	1,16	1,56
96				0,78	0,39	1,23	0,99	0,78	1,46			
97				0,88	0,92	0,83	1,03	1,19	1,31			
98				0,76	0,96	1,18	1,22	1,34	1,09			
99	0,19	0,89	0,90	0,96	0,89	1,32	0,98	1,00	1,24	1,12	1,26	1,34



**Таблица 2 – Значения стандартных отклонений по оксиду углерода ( $S_{CO}$ ), оксидам азота ( $S_{NOx}$ ) и температуре  $S_{T^{\circ}}$  в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов осевого компрессора для ГПА Solar № 2**

Обороты осевого компрессора, $n_{ок},\%$	Наработка двигателя, час											
	24600			26100			27300			28500		
	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^{\circ}}$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^{\circ}}$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^{\circ}}$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^{\circ}}$
90	0,68	0,60	0,46	0,84	0,71	0,69	0,56	0,70	0,80	0,72	0,49	0,57
91				0,71	0,00	0,39	0,74	0,56	0,86			
92				0,56	0,56	1,00	0,41	0,68	0,70			
93				0,84	0,66	1,13	0,62	0,78	0,72			
94				0,52	0,24	1,12	0,78	0,65	0,81			
95	0,72	0,86	0,92	0,80	0,38	0,82	0,84	0,79	0,78	0,48	0,70	0,88
96				0,76	0,68	0,70	0,48	0,82	0,70			
97				0,50	0,78	1,00	0,56	0,72	1,00			
98	0,80	0,48	0,64	0,00	0,90	1,00	0,69	0,90	0,96			
99				0,72	0,58	1,18	0,78	0,81	0,82	0,86	0,56	0,78

**Таблица 3 – Значения стандартных отклонений по оксиду углерода ( $S_{CO}$ ), оксидам азота ( $S_{NOx}$ ) и температуре  $S_{T^{\circ}}$  в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов осевого компрессора для ГПА Solar № 3**

Обороты осевого компрессора, $n_{ок},\%$	Наработка двигателя, час											
	22800			24900			26200			26300		
	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^{\circ}}$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^{\circ}}$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^{\circ}}$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^{\circ}}$
90	0,88	0,78	1,12	0,82	0,78	0,99	1,26	1,20	1,13			
91				0,80	1,12	0,83	1,14	0,91	1,88	0,64	0,42	0,54
92				1,06	0,86	1,10	0,82	0,88	1,12			
93				0,94	0,78	1,00	0,72	1,49	1,37			
94				0,78	0,74	0,88	0,98	0,85	1,24			
95	0,90	0,76	0,85	1,08	1,02	0,82	1,27	1,36	1,04	0,56	0,48	0,65
96				0,96	0,68	1,14	0,94	0,89	1,98			
97				1,11	0,98	1,27	0,86	1,14	1,38			
98	0,83	0,68	1,20	0,80	0,90	1,18	0,99	1,00	1,27			
99				0,92	1,02	1,17	1,22	1,37	1,69	0,33	0,61	0,43

сиду углерода и температуре при  $n_{ок}$  более 97 %, большим 1,0. При наработке 27700 час полученные закономерности сохраняются, продолжается дальнейший рост всех стандартных отклонений. На основании этого анализа можно сделать вывод, что эксплуатировать ГПА № 1 целесообразно на режимах работы осевого компрессора 90–93 % до проведения регламентных работ представителями фирмы Solar.

Для ГПА № 2 стандартные отклонения по оксиду углерода и оксидам азота за все время эксплуатации от 24600 час до 28500 час не превышали 1,0, по температуре незначительные превышения наблюдались при наработке 26100 час. Выводы: ГПА № 2 в проведении регламентных работ не нуждается, эксплуатировать можно на всех режимах.

Для ГПА № 3 стандартные отклонения по температуре больше 1,0 наблюдались при наработке двигателя 22800 час. При наработке 24900 час стандартные отклонения больше 1,0 наблюдались по всем контролируемым параметрам. При наработке 26200 час произошел дальнейший рост стандартных отклонений по оксидам

углерода, они на отдельных режимах достигли 1,3, по оксидам азота – 1,5, по температуре – 2,0. При наработке 26300 час были проведены РТО и стандартные отклонения по всем параметрам стали – ниже 1,0.

На основании полученных данных по стабильности продуктов сгорания и температуры для ГПА типа Solar можно рекомендовать в качестве эталонных значения, представленные в табл. 4.

**Таблица 4 – Эталонные значения стандартных отклонений продуктов сгорания и температуры выхлопных газов, характеризующих состояние стационарного двигателя Таурус-60С для ГПА Solar**

№ п/п	Эталонные значения стандартных отклонений			Состояние двигателя, частота обследования
	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^{\circ}}$	
1	менее 1,0	менее 1,0	менее 1,0	Хорошее, 1500 час
2	менее 1,0	менее 1,0	более 1,0	Хорошее, 1000 час
3	1,0–1,3	1,0–1,3	1,0–1,3	Удовлетворительное, 500 час
4	более 1,5	более 1,5	более 2,0	Неудовлетворительное

**ГПА-16 «Урал» с авиационным двигателем ПС-90ГП-2**

В табл. 5 представлены результаты расчетов стандартных отклонений по оксиду углерода ( $S_{CO}$ ), оксидам азота ( $S_{NOx}$ ) и температуре ( $S_{T^*}$ ) в зависимости от времени наработки и мощности авиационного двигателя марки ПС-90ГП-2 ГПА-16 «Урал».

При наработке двигателя для ГПА № 1 18500 час произошло разрушение камеры сгорания. Значения стандартных отклонений, полученные при последних измерениях на этом ГПА, для оксида углерода достигают 3, для оксидов азота – 7, для температуры – 4,5. При наработке 8500 час значения  $S$  по оксидам азота и углерода на одном из режимов становятся больше 1,0, по температуре выхлопных газов – от 2 до 2,5. При эксплуатации ГПА 4100 час значения  $S$  по оксидам азота и углерода – меньше 1,0, по температуре выхлопных газов – больше 1,0.

Разрушение камеры сгорания двигателя ГПА № 2 и его замена произошли при наработке 14400 час. Имеются результаты измерений продуктов сгорания при наработке двигателя 9700 час. Расчет стандартных отклонений дает значения по оксидам азота от 1,3 до 1,7, по оксиду углерода – от 0,9 до 1,3, по температуре выхлопных газов – от 1,7 до 2,7. Стандартные отклонения при наработке двигателя 2500 час по всем параметрам –

меньше 1,0. Новый двигатель при его эксплуатации 6400 час имеет значения  $S$  по оксидам азота и оксиду углерода на отдельных режимах немногим больше 1,0, по температуре – от 1,1 до 1,6.

Двигатель ГПА № 3 при эксплуатации 16900 час имеет значения  $S$  по оксидам азота от 0,8 до 1,2, по оксиду углерода – от 1,3 до 1,1, по температуре выхлопных газов – от 1,3 до 1,8. При наработке двигателя до 12600 час значения  $S$  по оксидам азота и оксиду углерода меньше 1,0, по температуре выхлопных газов – от 1,3 до 1,8.

Двигатель ГПА № 4 при наработке 2500 час имел значения  $S$  по оксидам азота до 2,6, по оксиду углерода – 1,7, по температуре – свыше 3 и был заменен на новый из-за разрушения камеры сгорания. При наработке 9300 час новый двигатель имел значения  $S$  по оксиду углерода не более 1,0, по оксидам азота – не более 1,1, по температуре – от 1,3 до 1,9.

Анализ стабильности продуктов сгорания от авиационных двигателей марки ПС-90ГП-2 для ГПА-16 «Урал» показывает возможность проведения ТО не по времени наработки, а по состоянию двигателя. В табл. 6 приведены эталонные значения стандартных отклонений продуктов сгорания и температуры выхлопных газов, характеризующих состояние двигателя.

**Таблица 5 – Значения стандартных отклонений по оксиду углерода ( $S_{CO}$ ), оксидам азота ( $S_{NOx}$ ) и температуре  $S_{T^*}$  в зависимости от времени наработки авиационного двигателя марки ПС-90ГП-2 и мощности для ГПА-16 «Урал»**

ГПА	W,%	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^*}$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^*}$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^*}$	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_{T^*}$
		Продолжительность эксплуатации ГПА/наработка двигателя/с последнего РТО, час											
№ 1		4100/4100/150			8500/8500/100			18500/18500/1100			19200/6300/0		
	95										0,44	0,27	0,55
	85				0,86	1,00	1,96	1,67	2,74	2,11	0,73	0,48	0,47
	75	0,58	0,73	1,36	0,92	0,98	1,76	2,93	6,89	3,63	0,41	0,32	0,27
	65	0,64	0,55	1,12	1,12	1,23	2,42	1,70	2,04	4,54	0,38	0,49	0,66
№ 2		2500/2500/0			9700/9700/1100			14500/100/0			21000/6400/900		
	95										0,63	0,68	1,23
	85				1,24	1,27	1,68	0,55	0,38	0,88	0,48	0,97	1,34
	75	0,58	0,43	0,76	0,89	1,39	2,02	0,67	0,68	0,59	0,49	1,08	1,60
	65	0,63	0,33	0,48	1,28	1,68	2,67	0,48	0,42	0,62	0,72	0,58	1,14
№ 3		5000/5000/1200			9000/9000/510			12600/12600/200			16900/16900/700		
	95										0,92	0,81	1,51
	85				0,63	0,72	1,14	0,62	0,68	1,56	0,96	0,76	1,32
	75	0,56	0,84	0,87	0,91	0,46	1,64	0,98	0,53	1,82	1,08	1,15	1,64
	65	0,72	0,65	1,34	0,46	0,43	1,08	0,71	0,89	1,32	0,84	1,20	1,80
№ 4		2500/2500/900			3700/1200/150			8500/4800/700			17700/9300/600		
	95										0,86	0,74	1,86
	85				0,52	0,64	0,84	0,62	0,97	1,37	0,73	0,72	1,32
	75	1,57	2,64	3,17	0,72	0,83	0,56	1,02	0,68	1,00	0,86	1,11	1,83
	65	1,73	1,59	1,91	0,48	0,49	0,93	0,82	0,75	1,34	1,00	0,74	1,44
55													



**Таблица 6 – Эталонные значения стандартных отклонений продуктов сгорания и температуры выхлопных газов, характеризующих состояние двигателя марки ПС-90ГП-2 для ГПА-16 «Урал»**

№ п/п	Эталонные значения стандартных отклонений			Состояние двигателя, частота обследования
	$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T$	
1	менее 1,0	менее 1,0	менее 1,0	Хорошее, 1500 час
2	менее 1,0	менее 1,0	более 1,3	Хорошее, 1000 час
3	1,0–1,3	1,0–1,3	1,3–1,8	Удовлетворительное, 500 час
4	1,3–3,0	1,3–3,0	1,8–3,0	Условно-удовлетворительное, 250 час
5	более 3,0	более 3,0	более 3,0	Неудовлетворительное

### ВЫВОДЫ

Проведение диагностики камеры сгорания газотурбинного двигателя ГПА по стабильности продуктов сгорания и температуре в дымовой шахте дало положительные результаты. Дальнейший набор статистических данных по измерениям продуктов сгорания, температуре и их анализу позволит корректировать эталонные значения по оксиду углерода ( $S_{CO}$ ), оксидам азота ( $S_{NOx}$ ) и температуре ( $S_T$ ) в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов и проводить диагностику с большей надежностью. Диагностика оборудования по предлагаемому способу может проводиться непосредственно персоналом компрессорной станции после прохождения небольшого обучения, легко реализуема, что связано с использованием простого, доступного и относительно недорогого оборудования. С помощью данной диагностики возможно в кратчайший срок получить необходимый набор статистических данных, на основании которых сделать диагностические выводы об эффективности работы ГПА и дать рекомендации по режимам его использования. Комплексное использование предлагаемой методики с имеющимися данными по вибродиагностике и параметрической диагностике позволит значительно увеличить надежность заключений о состоянии ГПА, следовательно, сократить количество аварий, перейти от эксплуатации ГПА по РТО на эксплуатацию ГПА «по состоянию», что существенно снизит трудозатраты.

Описано методику діагностики камери згорання газотурбінного двигуна газоперекачувального агрегату за вимірними значеннями концентрацій оксиду вуглецю, оксидів азоту і температур відхідних газів у вихлопній шахті. Показано, що обробка отриманих експериментальних результатів методами математичної статистики та визначення стандартних відхилень щодо оксиду вуглецю ( $S_{CO}$ ), оксидів азоту ( $S_{NOx}$ ) і температури ( $S_T$ ) від еталонних величин дозволяє проводити діагностику двигуна з достатньою надійністю.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев, Ю.Н. Вибрационный контроль технического состояния газотурбинных газоперекачивающих агрегатов / Ю.Н. Васильев – М.: Недра, 1987.
2. Пат. 2006751 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> F23N5/24. Способ контроля изменения концентрации окислов азота в выхлопных газах газотурбинной установки / Шуровский В.А., Сеницын В.Н., Корнеев В.И.; заявитель и патентообладатель Всероссийский НИИ природных газов и газовых технологий. – № 4940304; заявл. 30.05.91; опубл. 30.01.1994, Бюл. № 23. – 6 с.: ил.
3. Пат. 2245491 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F23 № 5/00, G01R33/02. Способ контроля режима горения в газотурбинной установке и устройство для его осуществления / Пушкин Н.М., Шуров Ю.П., Юлдашев Э.М.; заявитель и патентообладатель ФГУП НПО измерительной техники. – № 2002113378; заявл. 22.05.02; опубл. 27.01.05, Бюл. № 3. – 15 с.: ил.
4. Пат. 2310180 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> 60/М15/14. Способ диагностики и прогнозирования надежности газотурбинных двигателей на установившихся и неустойчивых режимах работы / Голенцов Д.А., Божнов А.И.; заявитель и патентообладатель ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова». – № 2006108603; заявл. 21.03.06; опубл. 10.11.07, Бюл. № 31. – 9 с.: ил.
5. Химическая энциклопедия: Т. 1. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – С. 594–598.
6. Химическая энциклопедия: Т. 4. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1995. – С. 129–130.
7. Методика 83-00-900 ПМ 156. Газотурбинная установка ГТУ-16П. Комплексное диагностическое обследование по эксплуатационным параметрам.
7. Венцель, Е.С. Теория вероятности / Е.С. Венцель. – М.: Наука, 1969.
9. СТО Газпром 2-3.5-038-2005. Инструкция по проведению контрольных измерений вредных выбросов газотурбинных установок на компрессорных станциях. – М., 2005.

*Поступила в редакцию 20.04 2011*

This article describes the method for diagnosing combustion chamber of gas turbine engine of gas compressor unit by the measured concentrations of carbon oxide, nitrogen oxides and waste gas temperatures in an exhaust pipe. It is shown that processing of experimental results by methods of mathematical statistics and determination of standard deviations on carbon oxide ( $S_{CO}$ ), nitrogen oxides ( $S_{NOx}$ ) and temperature ( $S_T$ ) from the reference quantities enables diagnosing an engine with enough reliability.