

АННОТАЦИЯ

В условиях длительной эксплуатации и широкого диапазона изменения режимов работы газоперекачивающих агрегатов актуальными являются их безаварийная работа, безопасное вибрационное состояние отдельных узлов и деталей, своевременная и достоверная диагностика. В статье предлагается использование параметрической диагностики газоперекачивающего оборудования, позволяющее решать ряд задач по поддержанию его надёжности, экономичности, экологичности и маневренности. Её применение помогает оценить техническое состояние газоперекачивающих агрегатов, выявить отклонения в их работе и предложить эффективные мероприятия по их устранению.

ANNOTATION

In conditions of prolonged operation of gas compressor units and wide range of their operation modes it is important to sustain trouble-free operation, safe vibrational state of all elements of equipment as well as to keep their up-to-date and reliable diagnosis. In the article it is proposed to use parametric diagnostics of gas compression equipment, which allows solving a number of tasks such as maintaining its reliability, efficiency, environmental friendliness and mode flexibility. Practical use of parametric diagnostics of gas compression units would help to identify problems in their work and suggest the most effective actions aimed at fixing them.

Параметрическая диагностика газоперекачивающих агрегатов

Е. И. Купреев, м. т. н., инженер ОАО «Газпром трансгаз Беларусь», Н. Б. Карницкий, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции» БНТУ

На сегодняшний день вопросы улучшения показателей надёжности, экономичности, маневренности и ремонтпригодности турбоагрегатов являются актуальными. Не менее важным является продление срока службы узлов и деталей и расширение допустимых режимов работы. На первый план выходят задачи предотвращения аварий, связанных с отказом отдельных деталей и узлов турбины, обеспечения безопасного вибрационного состояния агрегата, разработки методов и средств диагностики, позволяющих организовать обслуживание и ремонт оборудования по техническому состоянию [1, 6].

Основное назначение технической диагностики состоит в повышении надёжности объектов на этапе их эксплуатации. Это иногда вызывает возражения, поскольку многие считают, что надёжность есть свойство самого турбоагрегата. Однако отметим, что коэффициенты готовности и технического использования — два основных комплексных показателя надёжности — зависят от длительности ремонта в связи с отказами, а последний ещё и от затрат времени на плановые ремонты. Поэтому если методами технической диагностики удаётся выявить

возникновение дефекта и прогнозировать его развитие, то это позволяет не только сократить количество отказов, но и устранять имеющиеся дефекты во время плановых обслуживаний и ремонтов, сократить объёмы и сроки ремонтных работ за счёт их правильного планирования и организации [2].

Конечно, техническая диагностика позволяет выявить и устранить, а часто предотвратить производственный брак, возникающий на этапах изготовления и монтажа или в процессе ремонта агрегатов. Тем не менее дефекты такого рода проще контролировать прямыми методами в процессе производства этих работ и не допускать их, а не констатировать постфактум.

Всё сказанное помогает сформулировать следующие основные цели технической диагностики, определяющие её экономическую эффективность:

- ♦ обнаружение повреждений или дефектов на начальной стадии их развития;
- ♦ оценка допустимости и целесообразности дальнейшей эксплуатации оборудования с учётом прогнозирования его технического состояния при выявленных дефектах;
- ♦ оптимизация режимов работы, позволяющая безопасно эксплуатировать агрегат с выявленными дефектами до момента его вывода в плановый ремонт;

- ♦ организация обслуживания и ремонта оборудования по техническому состоянию (вместо регламентного обслуживания и ремонта), обеспечение подготовки и выполнения качественных ремонтов [3].

Следует особо подчеркнуть, что все задачи диагностики обращены не на предотвращение гипотетической аварии, в том числе с тяжёлыми последствиями, а на организацию эксплуатации и ремонта таким образом, чтобы не допустить развития дефектов до опасных пределов, включая дефекты, способные привести к отказам и авариям с тяжёлыми последствиями.

При такой постановке задачи диагностики становится абсолютно ясным, что наибольший эффект от её внедрения будет достигаться только на ремонтно-пригодных агрегатах, причём таких, ремонт которых возможен в том числе и непосредственно в условиях эксплуатации. Именно за счёт сокращения затрат на ремонт, составляющие которых определяются увеличением продолжительности межремонтных периодов, сокращением объёмов ремонтов, загруженностью ремонтного персонала, номенклатурой и количеством заранее приобретаемых и хранимых запасных частей, достигается экономический эффект от внедрения диагностики.

Поставка на компрессорные станции (КС) магистральных газопроводов газотурбинных установок (ГТУ) новых конструкций, обладающих большей контролеспособностью, должна облегчить достоверную оценку состояния агрегата. Однако для существующих газоперекачивающих агрегатов (ГПА) целесообразно применить методы параметрической диагностики с использованием текущей технологической информации.

Большая часть дефектов и неисправностей может быть установлена методами вибродиагностики, пригодными для обнаружения дефектов практически всех элементов агрегата. Около 30 % всех неисправностей ГПА и большинство дефектов проточной части обнаруживается анализом термогазодинамических параметров (параметрическая диагностика), и около 20 % неисправностей (в основном только пар трения) регистрируются по результатам трибодиагностики [4].

Параметрическая диагностика изучает характер, степень и быстроту трансформации термогазодинамической модели ГПА в эксплуатационных условиях. При заметной трансформации (что характерно для газопроводных ГПА) диагностика должна автома-

тически включаться в систему технологических расчётов магистрального газопровода. Обоснованное включение этих показателей в расчёты режимов ГПА, КС и газопроводов является в данный момент главной задачей параметрической диагностики газотурбинных ГПА [5].

Параметрическая диагностика ГПА может быть использована при решении следующих задач:

- ♦ определении состояния ГПА;
- ♦ оценке качества ремонта узлов ГПА;
- ♦ оценке качества очистки компрессора на ходу;
- ♦ уточнении энергетических и топливных затрат на КС и разработке рекомендаций по их снижению;
- ♦ осуществлении технологической интерпретации диагностических параметров других методов диагностики;
- ♦ повышении надёжности и эффективности работы газопроводов;
- ♦ разработке системы энергетических экспресс-расчётов;
- ♦ совершенствовании системы энергетических нормативов.

В параметрической диагностике ГПА как сложной силовой установки обычно учитывается (качественно и количественно) фактор сдвига приведённых технологических характеристик этой установки. По значению сдвига судят о состоянии установки или её элементов, а также о возможном оставшемся ресурсе. Параметрическая диагностика этих ГТУ строится как диагностика отдельных узлов: воздушного компрессора, газовой турбины, камеры сгорания и регенератора.

Обобщённые требования, которые необходимо учесть при составлении параметрической диагностики газотурбинных ГПА, используемой для оценки состояния агрегата и уточнения его технологических показателей, сводятся к следующему:

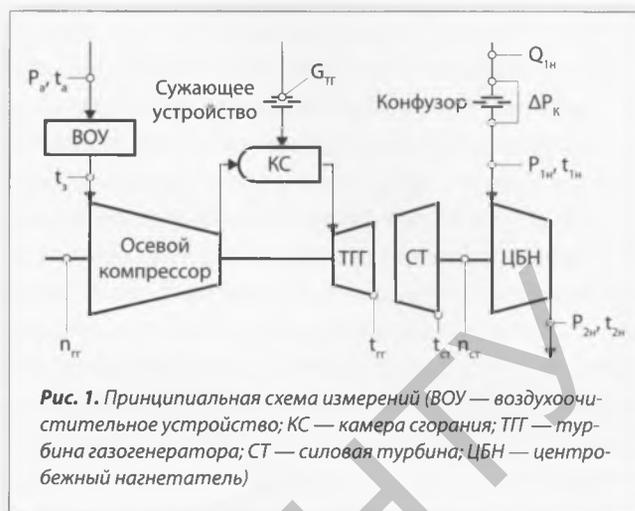
- ♦ система приведённых характеристик как для нагнетателя, так и для ГТУ является однопараметрической (для каждого конкретного состояния);
- ♦ состояние установки (нагнетателя или ГТУ) характеризуется постоянством системы приведённых характеристик на данный момент (действительным в широком диапазоне режимов);
- ♦ приведённые характеристики центробежных нагнетателей (ЦБН) и ГТУ, связывающие между собой основные отчётные технологические показатели и имеющие физический смысл

технологических потоков (основные характеристики), сдвига не имеют или имеют небольшой сдвиг;

- ♦ в уточнённых технологических расчётах ГПА необходимо и достаточно иметь по одному коэффициенту технического состояния (КТС) для нагнетателя и ГТУ (в целом для ГПА — два);
- ♦ первоначальный разброс характеристик ГПА (в том числе и основных) может быть оценён величиной предварительного сдвига;
- ♦ состояния нагнетателя и ГТУ сравниваются с начальными состояниями соответствующего межремонтного периода; в технологических расчётах эталоном могут служить, по-видимому, только паспортные характеристики (любое состояние — текущее или предварительное — сравнивается с паспортным);
- ♦ для оценки состояния и определения технологических показателей ГПА достаточно иметь для нагнетателя и ГТУ основную и дополнительную (со сдвигом) характеристики.

Особенности параметрической диагностики на компрессорной станции «Крупская»

При участии персонала КС «Крупская» 6 мая 2015 г. была проведена параметрическая диагностика ГПА 16-01 «Урал» ст. № 1, 3, 4, 6 с двигателями ПС-90ГП-2 Пермского моторного завода и ЦБН типа НЦ16К/МХИ (7V-3 для ГПА ст. № 6). В процессе диагностики температура газа на входе и выходе



из ЦБН измерялась образцовым прибором ТЦМ 9410Ех/М1Н с платиновыми термопреобразователями типа ТТЦ 01-180. При проведении испытаний на ГПА ст. № 6 расход технологического газа, перекачиваемого ЦБН, измерялся ультразвуковым расходомером DigitalFlow CTF878 (GE Panametrics) с накладными преобразователями. Остальные показания снимались с помощью штатных средств измерений. Схема измерений представлена на рис. 1. Перечень измеряемых параметров, средств измерений и максимальных требуемых погрешностей представлен в табл. 1. Также в процессе испытаний проводился замер выбросов вредных (загрязняющих) веществ в уходящих дымовых газах двигателя. Данные об объектах диагностирования приведены в табл. 2.

Табл. 1. Изменяемые параметры

Наименование параметра	Обозначение на рис. 1	Абсолютная погрешность, (относительная погрешность)	Измерительный прибор
Температура газа на входе в ЦБН, °С	$t_{1н}$	0,06	ТЦМ 9410Ех/М1Н
Температура газа на выходе из ЦБН, °С	$t_{2н}$	0,06	
Барометрическое давление, Па	P_a	200	Штатные средства измерений
Температура наружного воздуха, °С	t_a	0,5	
Температура воздуха на входе в ОК, °С	t_3	0,5	
Частота вращения ротора ТГГ, об/мин	$n_{ГТ}$	20	
Частота вращения ротора СТ, об/мин	$n_{СТ}$	20	
Температура продуктов сгорания после ТГГ, °С	$t_{ГТ}$	0,5	
Температура продуктов сгорания за СТ, °С	$t_{СТ}$	0,5	
Расход топливного газа	$G_{ГТ}$	(1 %)	
Избыточное давление газа на входе в ЦБН	$P_{1н}$	(0,2 %)	
Избыточное давление газа на выходе из ЦБН	$P_{2н}$	(0,2 %)	
Расход технологического газа	$Q_{1н}$	(2 %)	DigitalFlow CTF878
Состав уходящих дымовых газов	—	0,2	Газоанализатор «Полар Ех-Т»

При обеспечении требуемых погрешностей средств измерений среднеквадратическая относительная погрешность расчёта показателей энергоэффективности ГПА составляет:

- ♦ мощность агрегата — не более 5 %;
- ♦ эффективный КПД ГТУ — не более 3 %;
- ♦ политропный КПД ЦБН — не более 2 %.

Измерения проводились в 4 установившихся режимах работы ГПА. Параметры перекачиваемого газа взяты по данным газоиспытательной станции (ГИС) «Кондратки».

По результатам измерений теплотехнических параметров двигателя и ЦБН рассчитывались величины:

- ♦ фактических выходных показателей (развиваемой мощности, эффективного КПД) и технического состояния двигателя;
- ♦ фактических выходных показателей (расхода, степени сжатия, политропного КПД) и технического состояния ЦБН.

Все показатели и характеристики ЦБН и ГТУ определялись по известным методикам [7, 8].

Табл. 2. Данные об объектах диагностирования

Наименование параметра	ГПА № 1	ГПА № 3	ГПА № 4	ГПА № 6
Тип двигателя	ПА-90ГП-2	ПС-90ГП-2	ПС-90ГП-2	ПС-90ГП-2
Общая наработка двигателя, ч	40298	26961	34131	40733
Наработка двигателя после капитального ремонта, ч	13298	1961	9130	22943
Наработка двигателя после промывки ГВТ, ч	1380	422	1624	488
Тип ЦБН	НЦ16К/МХИ	НЦ16К/МХИ	НЦ16К/МХИ	7V-3
Общая наработка ЦБН, ч	44790	43099	46431	41715

Табл. 3. Измеренные параметры работы ГПА № 1

Наименование параметра	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Время проведения замера	10:13	11:02	11:41	13:31
Параметры ГТУ				
Барометрическое давление, кПа	99,8	99,8	99,8	99,8
Температура атмосферного воздуха, °С	19,3	19,5	20,5	21,7
Температура воздуха на входе в ОК, °С	18,3	18,7	19,8	20,8
Частота вращения ротора ТГГ, об/мин	10 636	10 736	10 916	10 391
Частота вращения ротора СТ, об/мин	4 651	4 793	4 979	4 395
Температура продуктов сгорания после ТГГ, °С	708	741	788	662
Температура продуктов сгорания после СТ, °С	483	496	518	468
Массовый расход топливного газа, кг/ч	2 810	3 082	3 450	2 383
Объёмная низшая теплота сгорания топливного газа, МДж/м ³	34,0	34,0	34,0	34,0
Параметры вредных выбросов в уходящих дымовых газах				
Температура уходящих дымовых газов в штатной точке измерения, °С	471	486	506	455
Концентрация оксид азота (NO), ppm	63	73	87	48
Концентрация диоксида азота (NO ₂), ppm	5	10	12	7
Концентрация оксида углерода (CO), ppm	25	23	21	30
Концентрация кислорода (O ₂), %	16	15,8	15,4	16,4
Концентрация диоксида углерода (CO ₂), %	2,8	2,9	3,1	2,6
Параметры ЦБН				
Давление газа на входе в нагнетатель (изб.), кПа	5930	5930	5950	5940
Давление газа на выходе из нагнетателя (изб.), кПа	8220	8210	8200	8230
Температура газа на входе в нагнетатель, °С	22,17	22,16	22,25	22,28
Температура газа на выходе из нагнетателя, °С	50,38	50,72	51,36	49,96
Объёмная производительность, м ³ /с	4,40	4,86	5,50	3,57
Плотность газа при стандартных условиях,	0,6925	0,6925	0,6925	0,6925

Табл. 4. Сводная таблица расчётов

Наименование параметра	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Абсолютное давление газа на входе в нагнетатель, МПа	6,030	6,030	6,050	6,040
Абсолютное давление газа на выходе из нагнетателя, МПа	8,320	8,310	8,300	8,3330
Абсолютная температура газа на входе в нагнетатель, К	295,3	295,3	295,4	295,4
Абсолютная температура газа на выходе из нагнетателя, К	323,5	323,9	324,5	323,1
Средняя температура газа в нагнетателе, К	309,4	309,6	310,0	309,3
Относительная плотность газа по воздуху	0,5750	0,5750	0,5750	0,5750
Газовая постоянная, кДж/(кг·К)	0,4992	0,4992	0,4992	0,4992
Коэффициент сжимаемости газа на входе в нагнетатель	0,887	0,887	0,887	0,887
Коэффициент сжимаемости газа на выходе из нагнетателя	0,902	0,903	0,904	0,901
Средний коэффициент сжимаемости газа	0,895	0,895	0,896	0,894
Плотность газа на входе в нагнетатель, кг/м ³	46,11	46,11	46,26	46,17
Температурный показатель политропы	0,283	0,288	0,297	0,279
Показатель псевдоизоэнтропы	0,233	0,232	0,230	0,235
Объёмный расход транспортируемого газа через нагнетатель, м ³ /мин	264,0	291,6	330,0	214,2
Массовый расход газа через нагнетатель, кг/с	202,9	224,1	254,4	164,8
Внутренняя мощность нагнетателя, кВт	10946	12311	14417	8671
Приведённая температура газов после ТГ, К	696,9	728,1	770,6	643,5
Приведённая частота вращения ротора силовой турбины, об/мин	4 625	4 763	4 938	4 351
Концентрация оксидов азота (NO _x) в сухих уходящих газах, мг/м ³	139,6	170,4	203,3	112,9
Концентрация оксидов углерода (CO) в сухих уходящих газах, мг/м ³	31,3	28,8	26,3	37,5

Табл. 5. Результаты испытаний

Наименование параметра	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Параметры ГТУ				
Мощность на эксплуатационном режиме, кВт	11 169	12 563	14 711	8 848
Эффективный КПД ГТУ на эксплуатационном режиме, %	29,14	29,89	31,27	27,22
Приведённая к нормальным условиям (T = 288 К, P _a = 101 кПа) мощность в режиме эксплуатации, кВт	11 273	12 670	14 809	8 892
Располагаемая приведённая мощность, кВт	16 000	16 000	16 000	16 000
Коэффициент технического состояния проточной части ГТУ	1	1	1	1
Приведённая концентрация (при 0 °С; 0,1013 МПа и 15 % O₂) вредных выбросов в уходящих дымовых газах				
Оксиды азота (NO _x), мг/м ³	167,8	196,9	217,9	147,7
Оксиды углерода (CO), мг/м ³	37,6	33,2	28,1	49,0
Параметры ЦБН				
Приведённый объёмный расход транспортируемого газа, м ³ /мин	300,8	322,4	351,3	258,3
Политропный КПД, %	82,39	80,67	77,27	84,29
Степень сжатия нагнетателя	1,38	1,38	1,37	1,38
КТС	0,95	0,95	0,95	0,95
Коэффициент режима нагнетателя	1,00	0,98	0,95	1,00

Расчёт параметров работы ГПА

Техническая диагностика — это область знаний, исследующая технические состояния объектов диагностирования и отражение технических состояний в физических единицах, разрабатывающая методы их определения, а также принципы построения и организацию использования системы диагностирования [9].

Под техническим состоянием при этом понимается совокупность свойств объекта, подверженных изменению в процессе его «жизненного цикла», характеризуемая в определённый момент времени показателями, прогнозируемыми на начальной стадии проектирования и установленными нормативно-технической документацией на объект, формирующей номенклатуру и допустимые пределы количественных и качественных характеристик, определяющих исправность, работоспособность и правильное функционирование объекта.

Графические зависимости, построенные по результатам параметрической диагностики ГПА ст. № 1, приведены на рис. 2–5.

В табл. 6 представлены сведения о работе ГИС «Кондратки» на момент проведения испытаний.

В табл. 7 представлены данные приёмо-сдаточных испытаний двигателя.

Табл. 6. Параметры работы ГИС «Кондратки»

Наименование параметра	Значение
Избыточное давление газа на входе КС, МПа	6,13
Температура газа на входе КС, °С	24,46
Текущий расход газа, $тм^3$	
- нормальные условия	3 827,6
- стандартные условия	4 110,1
Высшая теплотворная способность	
- МДж/ $м^3$	40,5
- ккал/ $м^3$	9 673,4
Низшая теплотворная способность	
- МДж/ $м^3$	34
- ккал/ $м^3$	8 125,9
Плотность газа, $кг/м^3$	
- нормальные условия	0,7436
- стандартные условия	0,6925
Температура точки росы, °С	
- по углеводородам	
- рабочие условия	-14,8
- по воде:	
- рабочие условия	-14,8
- при P = 3,92 МПа	-18,5

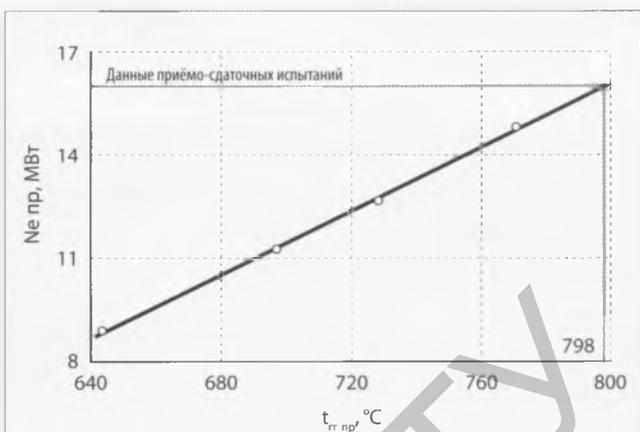


Рис. 2. Зависимость приведённой мощности ГТУ от приведённой температуры газов за ТГ

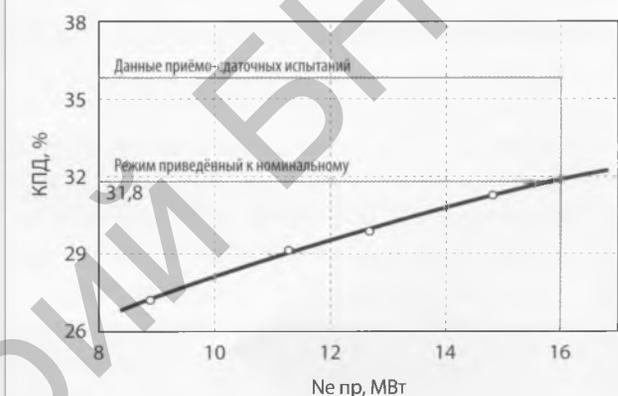


Рис. 3. Зависимость КПД ГТУ от приведённой мощности

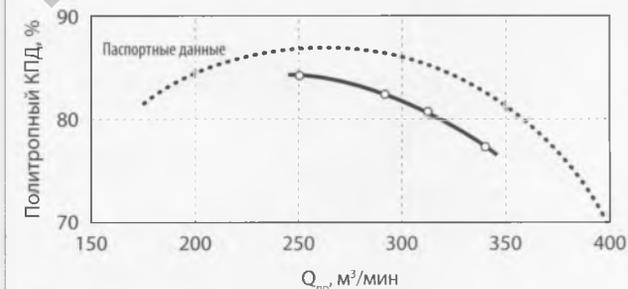


Рис. 4. Зависимость политропного КПД от приведённой производительности нагнетателя

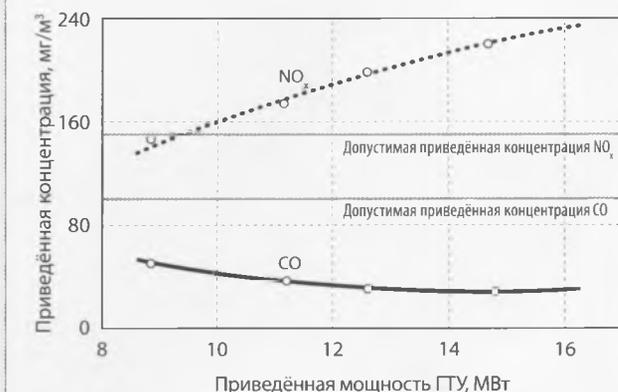


Рис. 5. Зависимость концентрации оксидов азота (NO_x) и оксидов углерода (CO) от мощности ГТУ

Табл. 7. Данные приёмо-сдаточных испытаний двигателя ст. № 1 (6 февраля 2010 г., параметры окружающей среды при проведении испытания: $P_n = 760,3$ мм рт.ст., $t_n = 14,9$ °С)

Наименование параметра	Минимальный режим работы $t_{\text{ж}} = +15$ °С	Номинальный режим работы $t_{\text{ж}} = +15$ °С	Максимальный режим работы $t_{\text{ж}} = -5$ °С
Частота вращения ротора газогенератора, об/мин	9 850	10 890	10 780
Частота вращения ротора силовой турбины, об/мин	3 489	5 279	5 609
Мощность, кВт	5 593	16 000	19 200
Давление воздуха за КВД P_n^* , МПа	1,14	1,87	2,11
Эффективный КПД	0,270	0,358	0,375
Температура за газогенератором, $T_{\text{гр}}$, °С	551	798	798
Температура за силовой турбиной, $t_{\text{гр}}$, °С	392	497	477

Выводы

Параметрическая диагностика на ГПА ст. № 1 показала:

- ♦ коэффициент технического состояния проточной части ГТУ, равный 1, позволяет оценить её как исправную, а состояние ЦБН как удовлетворительное ($KTC = 0,95$);
- ♦ наличие расхождений в показаниях расхода топливного газа на 15–17 % по сравнению с показаниями в аналогичных режимах в других ГПА. В результате этого эксплуатационный номинальный КПД ГТУ (при $N = 16\ 000$ кВт), полученный при испытаниях, составил 31,8 % при паспортном значении 35,8 %;
- ♦ вероятной причиной перерасхода топливного газа является некорректное измерение его расхода;
- ♦ необходимость поверки расходомерной шайбы и проверки алгоритма расхода топливного газа в системе автоматизированного управления ГПА.

ЭИМ

Литература

1. Вибрационная надёжность и диагностика турбомашин. Ч. 1. Вибрация и балансировка: Учебное пособие / Е. В. Урьев. — Екатеринбург: ГОУ УГТУ-УПИ, 2003. — 200 с.
2. Урьев Е. В. Основы надёжности и технической диагностики турбомашин: Учебное пособие. — Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 1996. — 71 с.

3. Урьев Е. В. Элементы теории надёжности и основы теории технической диагностики турбомашин: Учебное пособие. — Екатеринбург: ГОУ УГТУ-УПИ, 2000. — 53 с.

4. Питер Д. Трибология — возникновение и будущие задачи / Первая международная конференция «Энергодиагностика»: Сборник трудов. — М., 1995. — Т. 3. — С. 3–28.

5. Урьев Е. В., Агапитова Ю. Н. Концепция и реализация систем диагностики энергетического оборудования / Труды второй международной научно-технической конференции Уральского отделения АИН РФ. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000.

6. Китаев С. В. Разработка показателей дифференциации технического состояния газоперекачивающих агрегатов / С. В. Китаев, М. И. Кузнецова // Газовая промышленность. — 2014. — № 4. — С. 62–64.

7. Кулагин В. В. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и газотурбинных установок / В. В. Кулагин, С. К. Бочкарёв, И. М. Горюнов и др.; Под общ. редакцией В. В. Кулагина. — Москва: Машиностроение, 2005.

8. Вертепов А. Г. Метод оценки выходных показателей ГТУ в эксплуатационных условиях / А. Г. Вертепов // Газовая промышленность. — 2001. — № 3. — С. 31–33

9. Галиуллин З. Т. Технико-экономический анализ эффективности газотурбинного привода в транспорте природного газа / З. Т. Галиуллин, Е. В. Леонтьев, В. А. Щуровский. — Изв. АН СССР. — М.: Энергетика и транспорт, 1987.