

Александр Борисович ШАБАРОВ¹
Александр Михайлович МОИСЕЕВ²
Михаил Сергеевич БЕЛОВ³
Андрей Александрович АЧИМОВ⁴

УДК 662.5

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПРИВОДНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

- ¹ доктор технических наук, профессор
кафедры прикладной и технической физики,
Тюменский государственный университет
kaf_mms@utmn.ru
- ² начальник бюро эксплуатационного мониторинга
и контроля технического отдела,
Тюменские моторостроители
almoiseev1@rambler.ru; ORCID: 0000-0003-2022-8849
- ³ кандидат технических наук, доцент
кафедры физики, методов контроля и диагностики,
Институт промышленных технологий и инжиниринга,
Тюменский индустриальный университет;
заместитель начальника цеха № 35,
Тюменские моторостроители
belovms.gts@gmail.com
- ⁴ начальник технологического бюро цеха № 35,
Тюменские моторостроители
andrew.achimov@gmail.com

Цитирование: Шабаров А. Б. Информационная система стенда для испытания приводных газотурбинных двигателей / А. Б. Шабаров, А. М. Моисеев, М. С. Белов, А. А. Ачимов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Том 6. № 4 (24). С. 28-47.
DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-4-28-47

Аннотация

Рассмотрена задача определения технического состояния при проведении приемо-сдаточных испытаний (ПСИ) приводных и энергетических газотурбинных двигателей (ГТД), прошедших ремонт на специализированном предприятии. Приведено описание: стенда для испытания приводных и энергетических газотурбинных двигателей; стендовых систем контроля и измерения, методики проведения приемо-сдаточных испытаний; оценки качества отремонтированного двигателя на основании его термогазодинамических параметров; обработки результатов измерений полученных в ходе ПСИ. Рассмотрены перспективы внедрения дифференциальной диагностики на ремонтном предприятии. Обобщены материалы по системе дифференциальной (поузловой) диагностики ГТД. Отмечены особенности диагностики переходных режимов ГТД. Предложено как один из способов дальнейшего совершенствования дифференциальной диагностике переход от узла двигателя к его элементам. Для чего разработана методика и система измерения давления и температуры на входе и выходе ступени осевого компрессора. Приведен алгоритм обработки измеренных диагностических параметров.

Ключевые слова

Газотурбинный двигатель, приемо-сдаточные испытания, система контроля, дифференциальная диагностика узлов и элементов, многоступенчатый осевой компрессор.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-4-28-47

Введение

Одним из заключительных этапов при восстановительном ремонте приводных и энергетических ГТД является этап проведения предъявительских и приемо-сдаточных испытаний. Цель проведения предъявительских испытаний (ПИ): контроль качества и правильности сборки; обкатка двигателя первоначальная регулировка; замер теплотехнических характеристик ГТД; контроль работоспособности ГТД и его элементов на различных режимах; нагрузка узлов, агрегатов и деталей ГТД, для выявления преждевременного износа; контроля ГТД на соответствие ТУ и определения возможности приемки. После проведения успешных ПИ выполняется частичная разборка двигателя для дефектации и осмотра основных узлов, а также снятие технологических приспособлений и датчиков замера осевых усилий. Выполняется сборка двигателя и направление его на второй этап ПИ, при их успешном завершении приступают к приемо-сдаточным испытаниям, целью которых является: проверки качества сборки, окончательной регулировки и пломбировки регулирующих органов; определение характеристик ГТД; контроль ГТД на соответствие ТУ.

Испытания приводных двигателей проводятся на специализированных стендах, имеющих сложную технологическую схему с отдачей мощности ГТД на генератор при следующих основных отличиях стенда от условий эксплуатации: автоматизированная система управления двигателем и система контроля параметров стендовые технологические; на ГТД устанавливается только защит-

ная сетка, без системы подготовки воздуха; охлаждение масла осуществляется в стендовых маслоохладителях. Существенным отличием стендов является номинальная мощность генератора используемого в качестве нагрузочного устройства 12 МВт и 32 МВт.

Испытательные стенды ПАО «ТМ» подготовлены для испытаний ГТД производства ГП НПКГ «Зоря» — «Машпроект» типа ДН80, ДУ80, ДГ90, ДТ59, ДР59, ДЖ59, и могут быть модернизированы для иных типов приводных и энергетических двигателей с предельной мощностью до 32 МВт.

Стенд — это ряд помещений цеха рис. 1 оборудованных инженерными системами, обеспечивающими проведение испытаний ГТД и проверку соответствия параметров его работы требованиям технической документации [12].

Помещения стенда состоят из: испытательного бокса — место установки ГТД (1), генератора (4), системы подвода воздуха и топливного газа, газоотводящей системы (2), редуктора (3); технологического помещения — место размещения основных элементов систем смазки, охлаждения и водоподготовки (5).

На втором этаже находятся: помещения электрощитовой — место размещения электрооборудования; помещения пультовой — место размещения АСУ;

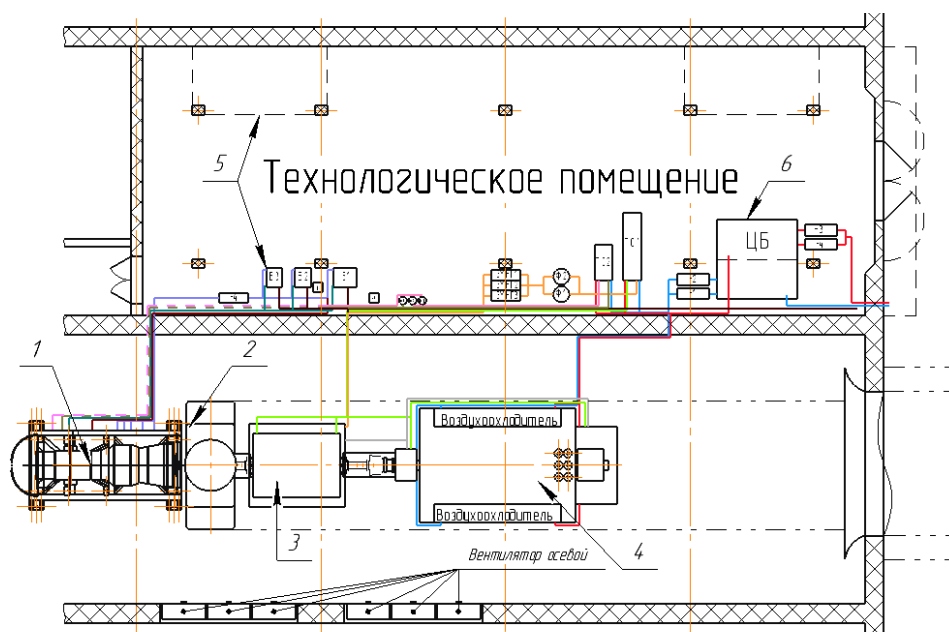


Рис. 1. Общая схема расположения основных помещений стенда:
1 — ГТД; 2 — газоотводящая система;
3 — редуктор; 4 — генератор;
5 — система смазки ГТД и водоподготовки;
6 — комплексное распределительное устройство

Fig. 1. The general layout of the main stand premises:
1 — GTD; 2 — gas outlet system;
3 — gearbox; 4 — generator;
5 — gas turbine engine lubrication and water treatment system;
6 — integrated control device

помещение комплексного распределительного устройства (6), включающего в себя устройство точной синхронизации, ячейку вводного выключателя, главную понижающую подстанцию — комплексное распределительное устройство, вводный вакуумный выключатель левого вращения генератора, вводный вакуумный выключатель правого вращения генератора, ячейка измерения мощности генератора и телеметрии; помещение венткамеры — место размещения основных элементов системы вентиляции.

Испытываемый ГТД монтируется на стенд с подключением следующих систем: топливного газа, смазки ГТД, замерные линии КИПиА, пусковой и газоотводящей системы. Запуск, регулировка режимов работы, остановка ГТД производится из помещения пультуовой стенда при помощи системы автоматического управления (САУ) с тремя независимыми автоматизированными рабочими местами (АРМ).

Стендовые системы контроля и измерения

К основным стендовым системам контроля испытуемого двигателя можно отнести следующие: измерительная система; система автоматического управления испытательного стенда с интегрированной системой параметрического контроля [11]. Основными задачами упомянутых систем является: получение сигналов от измерительных датчиков установленных на двигателе, усиление сигнала и его фильтрация, с последующей передачей и преобразованием; обработка полученных данных, осуществление записи данных в базу хранения; визуализация информации; мониторинг технического состояния. Управление ГТД во время пуска, работы и остановки осуществляется по девяти одновременно работающим контурам, которые основаны на пропорционально-интегрально-дифференциальных законах регулирования.

На испытательном стенде ПАО «ТМ» производятся следующие основные измерения параметров испытуемого ГТД, которые приведены в таблице 1, с требованием к контрольно-измерительным приборам.

Методика проведения приемо-сдаточных испытаний

Рассмотрим, в качестве примера технологический процесс прохождения ПСИ двигателя ДГ90 имеющего номинальную мощность при нормальных условиях 16 МВт и КПД не менее 33,5%.

ПСИ подвергается каждый ГТД прошедший капитальный ремонт на предприятии и имеющий положительные результаты ПИ. ПСИ проводятся при фактических параметрах наружного воздуха в условиях стенда (температура, барометрическое давление и относительная влажность).

После монтажа двигателя на стенд выполняется его холодная прокрутка, в ходе которой контролируются максимальные обороты компрессора низкого давления (КНД) и компрессора высокого давления (КВД), отсутствие посторонних шумов двигателя.

При отсутствии замечаний выполняется запуск двигателя и выход его на режим холостого хода (ХХ) прогрев в течении 15 минут.

Далее двигатель выводится на режим мощности $0,25N$, где N — номинальная мощность двигателя, выполняется проверка газоплотности наружного корпуса ГТД, герметичности его систем, проверка работоспособности измерительной аппаратуры.

Таблица 1

**Основные измеряемые параметры
ГТД при испытаниях**

Table 1

**Main measured parameters of the gas
turbine engine during testing**

№п/п	Измеряемый параметр	Погрешность измерения	Интервал измерения
1	частота вращения КНД, об/мин	± 10	0 ... 10 000
2	частота вращения КВД, об/мин	± 10	0 ... 10 000
3	частота вращения СТ, об/мин	± 10	0 ... 5 000
4	избыточное давление топливного газа, кгс/см ²	$\pm 0,6$	0 ... 40,0
5	избыточное давление масла на входе в ГТД, кгс/см ²	$\pm 0,1$	0 ... 10,0
6	избыточное давление топливного газа на форсунках относительно избыточного давления воздуха за КВД кгс/см ²	$\pm 0,06$	0 ... 4,0
7	*избыточное давление воздуха за КНД, кгс/см ²	$\pm 0,1$	0 ... 25
8	избыточное давление воздуха за КВД, кгс/см ²	$\pm 0,1$	0 ... 25
9	*избыточное давление воздуха за ТНД, кгс/см ²	$\pm 0,1$	0 .. 25
10	*избыточное давление воздуха в полости глубокого стравливания, кгс/см ²	$\pm 0,1$	0 ... 25
11	*избыточное давление воздуха в разгрузочной полости КНД/КВД*, кгс/см ²	$\pm 0,1$	0 ... 15
12	температура масла на входе в ГТД, °С	$\pm 1,0$	0 ... 150,0
13	температура воздуха на входе в ГТД, °С	$\pm 0,5$	-50 ... 50
14	полная температура рабочего тела за КНД, °С	$\pm 0,5$	-50 ... +200
15	*полная температура рабочего тела за КВД, °С	$\pm 0,5$	-50 ... +400
16	температура заторможенного потока рабочего тела за ТНД, °С	$\pm 16,5$	0 ... 1 100
17	температура масла на сливах из опор ГТД, °С	$\pm 1,0$	0 ... 150,0
18	барометрическое давление, мм.рт.ст.	$\pm 1,0$	0 ... 800
19	*активная мощность генератора, МВт	$\pm 0,2$	0 ... 32

*Параметры не измеряются в условиях эксплуатации.

*Parameters are not measured under operating conditions.

Для снятия теплотехнических характеристик выполняется ступенчатая загрузка двигателя на режимы 0,5N, 0,7N, 0,8N, 0,9N, 1N все контролируемые параметры регистрируются в протоколе испытаний при этом прогрев на каждом режиме происходит в течение не менее 15 минут. Выполняется замер корпусной вибрации, проверок давления в разгрузочной полости турбины нагнетателя (ТН) и перепада на контактных уплотнениях опорного венца турбины низкого давления (ТНД) и заднего корпуса КВД, контроль температурного поля за ТНД, проверка герметичности систем двигателя. При отсутствии замечаний, ГТД охлаждаются на режиме 0,25N, XX и останавливаются. Осматриваются сигнализаторы стружки в масле. Оценивается расход масла. Производится осмотр проточной части ГТД смотровыми приборами (КНД, компрессора высокого давления, камеры сгорания (КС), турбины высокого давления (ТВД), ТНД, ТН) [10].

На основании протокола испытаний, проведенных ПСИ, осмотра проточной части ГТД оформляется заключение о соответствии двигателя требованиям ТУ.

Основные данные получаемые в результате испытания двигателя

Для оценки соответствия качества отремонтированного двигателя требованиям ТУ определяются следующие параметры и характеристики ГТД:

- температура газов за ТНД (T_4) в зависимости от мощности;
- мощность в зависимости от частоты вращения ротора КВД;
- частота вращения ротора КНД и избыточного статического давления воздуха за КВД (P_2^*) от частоты вращения ротора КВД;
- уровни корпусной вибрации;
- температура масла на сливах из опор двигателя на максимальном режиме;
- КПД в зависимости от мощности.

Поскольку испытания двигателя проводятся при фактических параметрах наружного воздуха в условиях стенда (температура, барометрическое давление и относительная влажность) перед занесением их в формуляр двигателя необходима обработка результатов измерений, которая производится после анализа показателей регистрирующей аппаратуры.

Приведение к расчетным (нормальным) атмосферным условиям на входе в компрессор основных теплотехнических параметров ГТД, оговоренных в нормативной документации, выполняются по теории подобия с помощью коэффициентов приведения [10]. В качестве нормальных условий согласно ГОСТ 20440 приняты температура атмосферного воздуха $t_a^p = 15^\circ\text{C}$ ($t_a^p = 288,15\text{ K}$) и атмосферное давление $P_a^p = 101,3\text{ КПа}$.

Коэффициент приведения параметров ГТД по температуре атмосферного воздуха

$$\alpha = \sqrt{\frac{t_a^p}{t_a^{\text{изм}}}} \quad (1)$$

где $t_a^{\text{изм}}$ — температура воздуха, измеренная при входе в двигатель в К.

Коэффициент приведения параметров ГТД по атмосферному давлению

$$\beta = \frac{P_a^p}{P_{изм}^p}, \quad (2)$$

где $P_a^{изм}$ — атмосферное давление, измеренное на входе в двигатель кПа.

В соответствии с методикой [10] вычисляются приведенные параметры частоты вращения роторов КВД и КНД по формулам:

$$n_{КВД пр} = n_{КВД изм} \cdot \alpha, \quad (3)$$

$$n_{КНД пр} = n_{КНД изм} \cdot \alpha, \quad (4)$$

где $n_{КВД пр}$ — частота вращения ротора КВД приведенная к нормальным условиям, об/мин; $n_{КНД пр}$ — частота вращения ротора КНД приведенная к нормальным условиям, об/мин.

Определение температуры газов за ТНД приведенной к нормальным условиям производится по формуле:

$$t_{4 пр} = (t_{4 изм} + 273) \cdot \alpha^2 - 273, \quad (5)$$

где: $t_{04 изм}$ — измеренная температура газов за ТНД, °С; $t_{04 пр}$ — приведенная температура газов за ТНД, °С.

Приведение избыточного статического давления $P_{пр}$, Па, в газоздушном тракте двигателя производится по формуле:

$$P_{пр} = P_{изм} \cdot \beta. \quad (6)$$

Приведенная к стандартным атмосферным условиям мощность ГТД $N_{пр}$, Вт, определяется по формуле

$$N_{пр} = N_c \cdot \alpha \cdot \beta, \quad (7)$$

где N_c — эффективная мощность двигателя, которая находится по формуле

$$N_c = N_{эг} / (\eta_{эг} \cdot \eta_{тр}), \quad (8)$$

где $N_{эг}$ — мощность генератора, $\eta_{эг}$ — КПД генератора, $\eta_{тр}$ — КПД трансмиссии от генератора до ГТД.

Определение массового приведенного расхода топлива $G_{т пр}$, кг/с, производится по формуле:

$$G_{т пр} = G_{т изм} \cdot \alpha \cdot \beta, \quad (9)$$

где $G_{т изм}$ — замеренный массовый расход топливного газа, кг/ч.

Определение эффективного КПД ГТД производится по формуле

$$\eta_e = \frac{N_{пр} \cdot 10^3}{H_u \cdot G_{Тпр}}, \quad (10)$$

где H_u — низшая теплотворная способность топливного газа, дж/кг.

По результатам обработки данных протокола строятся и вносятся в формуляр двигателя следующие приведенные характеристики: $n_{кнд} = n_{кнд}(n_{квд})$, $P_2^* = P_2^*(n_{квд})$, $T_{тнд} = T_{тнд}(n_{квд})$, $G_{тпр} = G_{тпр}(N_{пр})$, $\eta_{пр} = \eta_{пр}(N_{пр})$. Примеры приведенных характеристик полученных при испытаниях отремонтированного двигателя ДГ90Л2 даны на рис. 2-6.

В качестве примера работы системы термогазодинамической диагностики двигателя, на рис. 7 и 8 приведены мощность N_e и КПД η при запуске, работе на номинальном режиме и при останове двигателя ДЦ59. В расчетах учитываются инерция роторов и тепловая энергия [2].

Следует отметить, что рис. 7 и 8 можно рассматривать как подтверждение возможности определения интегральных параметров двигателя N_e и η_e с использованием созданной на предприятии системы интегральной термогазодинамической диагностики.

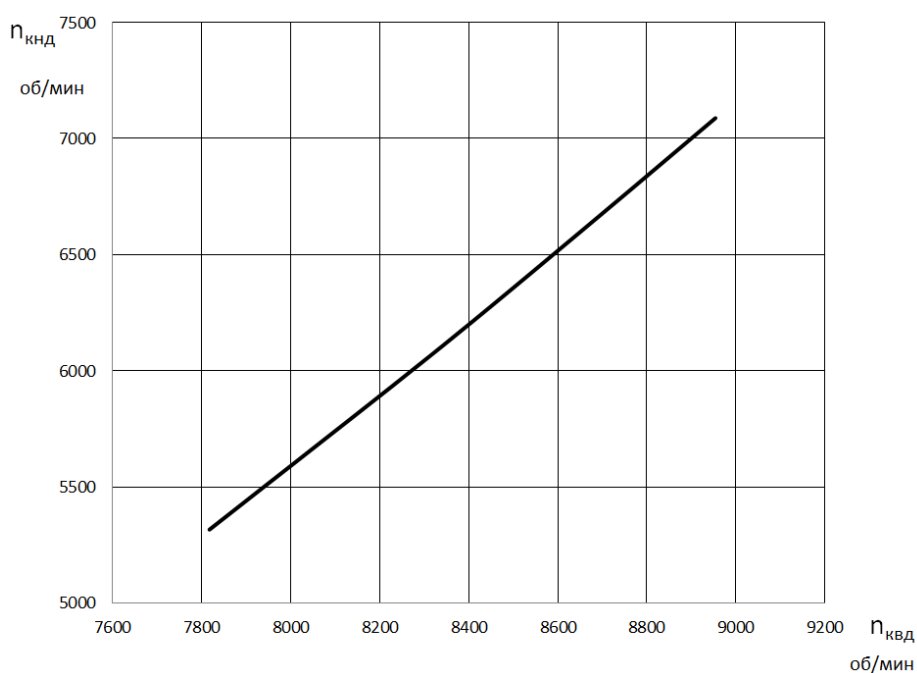


Рис. 2. Зависимость частоты вращения ротора КНД от ротора КВД

Fig. 2. Dependence of the rotation speed of the low-pressure compressor rotor on the high-pressure compressor rotor

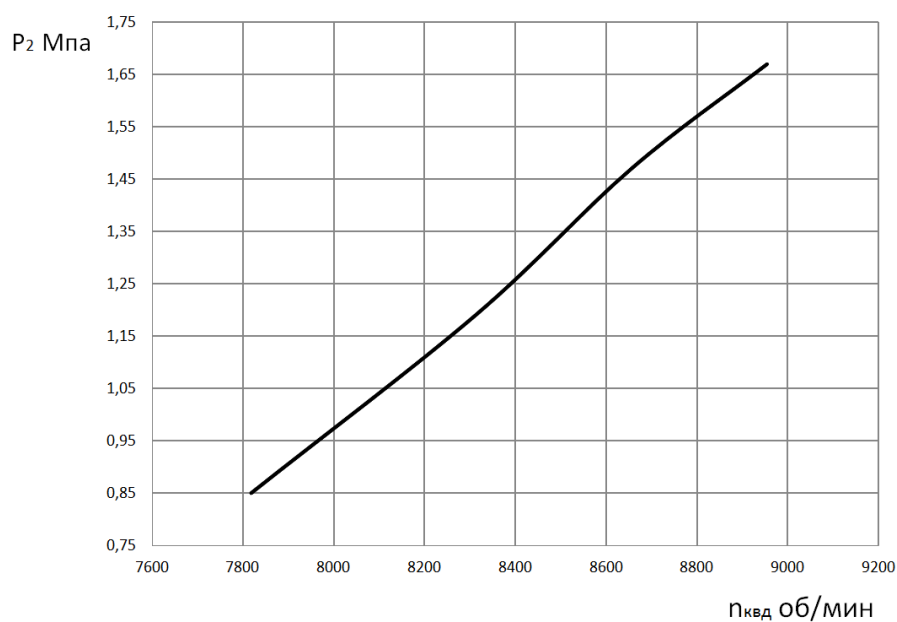


Рис. 3. Зависимость избыточного давления воздуха за КВД от частоты вращения ротора КВД

Fig. 3. Dependence of the excess air pressure for the high-pressure compressor on the rotation speed of the high-pressure compressor rotor

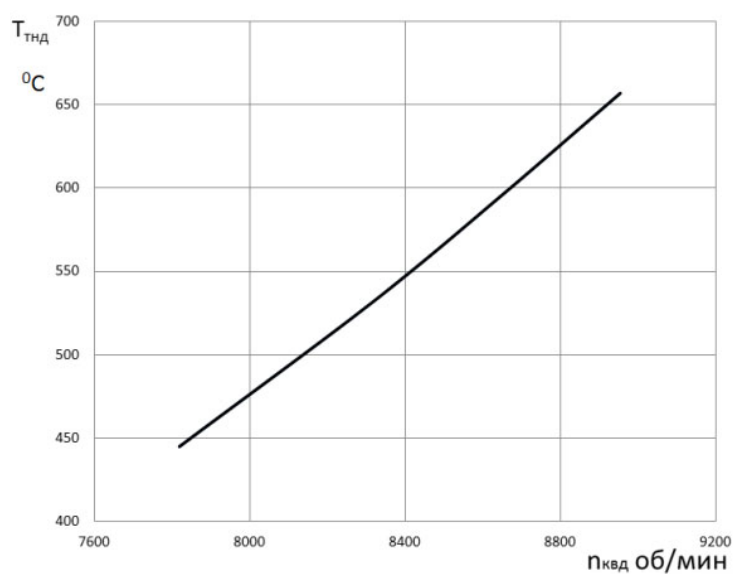


Рис. 4. Зависимость приведенной среднemasовой температуры рабочего тела за ТНД от приведенной усредненной частоты вращения ротора КВД

Fig. 4. Dependence of the gas temperature behind the low-pressure turbine on the high-pressure compressor rotor speed

Перспективы внедрения дифференциальной диагностики

Для оценки качества ремонта двигателя в настоящее время обычно применяется «интегральный» метод [1, 8, 9], т. е. производится определение технического состояния двигателя в целом, без определения состояния отдельных узлов и агрегатов ГТД, обоснованность которого определяет ограниченность измеряе-

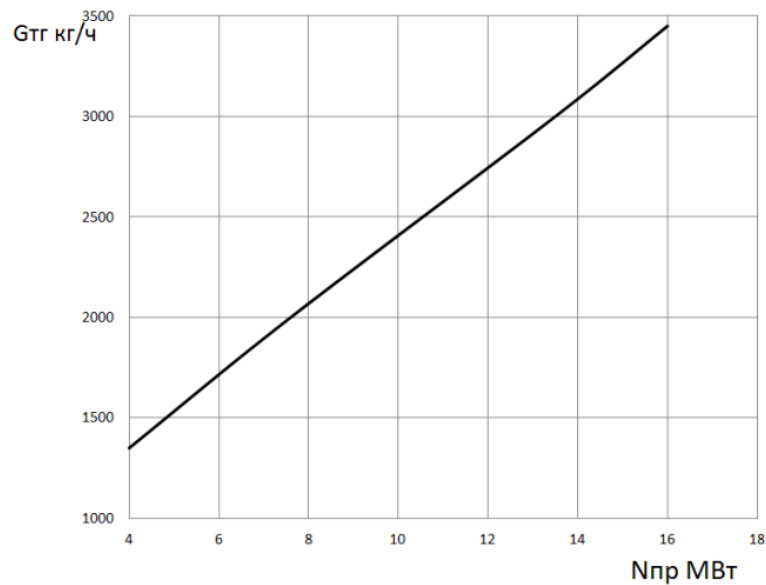


Рис. 5. Зависимость среднечасового расхода топливного газа от мощности двигателя

Fig. 5. Dependence of average hourly fuel gas consumption on engine power

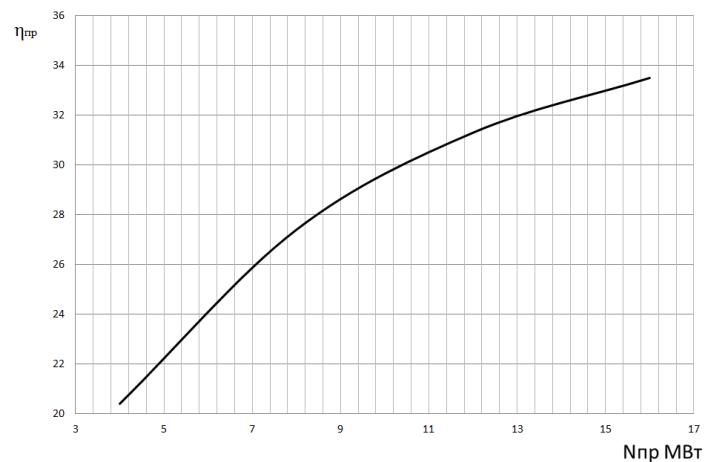


Рис. 6. Зависимость КПД двигателя от мощности

Fig. 6. Dependence of the engine efficiency on power

мых термогазодинамических параметров. Для измерения более полного объема параметров требуется внесение изменения в конструкторскую документацию и как следствие выполнения доработки корпусных деталей ГТД для обеспечения возможности установки дополнительных средств измерений.

Однако интегральные методы не дают возможности для определения причин выхода из строя отдельных деталей и узлов двигателя.

Разработанное и внедренное на предприятии техническое оснащение стенда позволяет проводить исследования не только интегральных характеристик ГТД, но и параметров дифференциальной диагностики. При дифференциальной диагностике узлов ГТД можно применять модели описанные в работе [3, 6, 4]. Исходя из опыта анализа аварийных остановов двигателей в эксплуатации, следует заметить, что превышение ограничительных уставок двигателя, таких

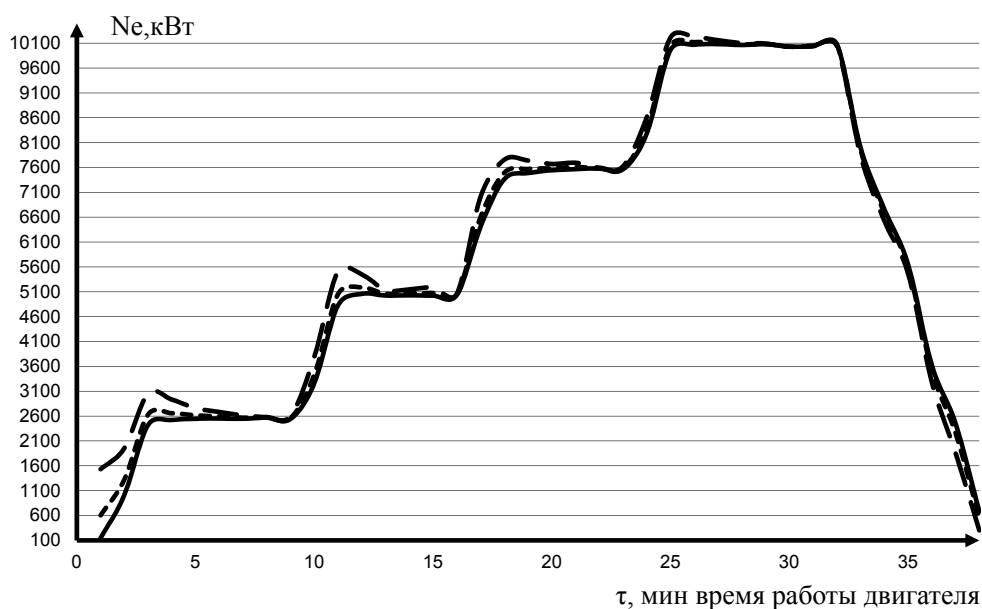


Рис. 7. Тренды приведенной мощности ГТД:
 (—) — фактическое значение расчетной мощности по измеренным параметрам без компенсации нестационарности процессов;
 (- -) — фактическое значение расчетной мощности по измеренным параметрам с учетом нестационарности;
 (- ·) — мощность отображаемая на АРМ САУ испытательного стенда

Fig. 7. Comparison of the calculated and measured power of the gas turbine engine in different operating conditions:
 (—) — the power of the gas turbine engine calculated from thermogasodynamic parameters (TGP) without taking into account unsteadiness;
 (- -) — the power of the gas turbine engine calculated according to the TGP, taking into account the unsteadiness;
 (- ·) — the power of the gas turbine engine (ACS) found by the power of the generator

как ($n_{кнд} \leq \max$, $n_{квд} \leq \max$, $n_{ст} \leq \max$, $T_{тнд} \leq \max$) внесенные в САУ из формуляра ГТД, после обследования двигателя оптическими смотровыми приборами обычно полагают, что двигатель имеет неустраняемые в эксплуатации дефекты.

Дифференциальная (поузловая) диагностика двигателя

Методы дифференциальной (поузловой) диагностики приводных ГТД разрабатывались отечественными учеными Е. Н. Яковлевым, А. Б. Шабаровым, С. В. Михаленко, М. С. Беловым и др. Метод позволяет повысить достоверность определения технического состояния узлов двигателя при проведении ПСИ. Для приводных ГТД вычисляются следующие коэффициенты, характеризующие техническое состояние:

1) по КПД:

$$k_{\eta} = \eta^* / \eta_0^*, \quad (11)$$

где η_0^* — эффективный коэффициент полезного действия турбомашины в момент начала наблюдения или определяется по данным газодинами-

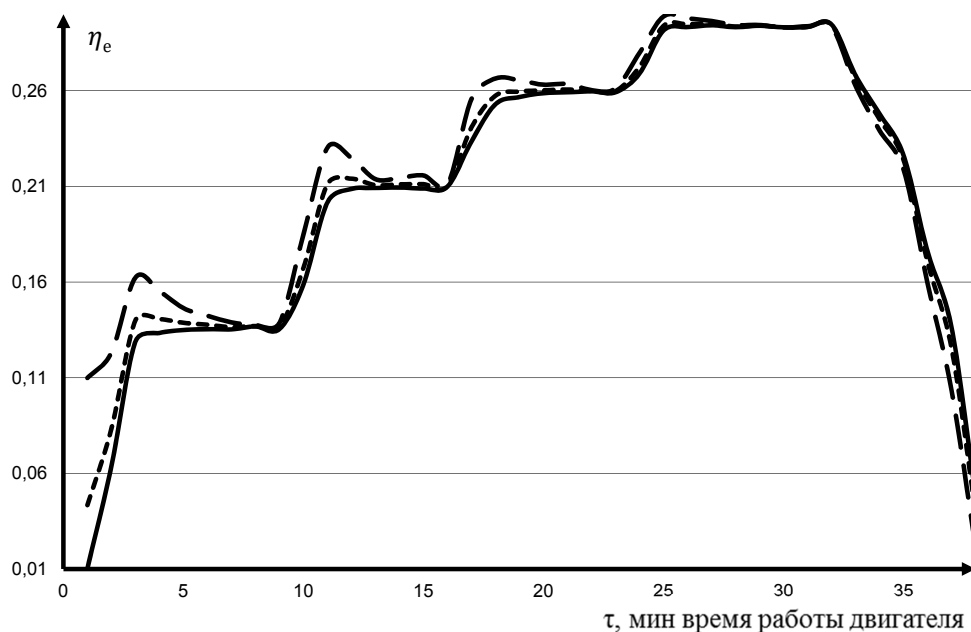


Рис. 8. Сравнение вычисленных КПД двигателя:

(—) — без учета компенсации нестационарности процессов;
 (- -) — с учетом компенсации нестационарности процессов;
 (- · -) — КПД, рассчитанный по мощности на генераторе

Fig. 8. Comparison of calculated engine efficiency:

(—) — without taking into account unsteadiness of transient modes;
 (- -) — taking into account the unsteadiness of transient modes;
 (- · -) — efficiency calculated from generator power

ческого паспорта ГТД, сформированного по результатам ПСИ в зависимости от частоты вращения одного из каскадов роторов двигателя и расхода рабочего тела;

2) по степени сжатия в осевом компрессоре:

$$k_{\pi} = \pi^* / \pi_0^*, \quad (12)$$

где π_0^* — степень сжатия осевого компрессора на соответствующем режиме по числу оборотов и расходу воздуха в исходном состоянии.

3) по мощности турбины:

$$k_{NT} = N_T / N_{T0}, \quad (13)$$

где N_{T0} — мощность газовой турбины определенная в момент начала мониторинга или по данным газодинамического паспорта.

Использование приведенных ниже базовых соотношений позволяет в условиях ограниченного количества измеряемых во время работы ГТД величин применять данный метод диагностики по термогазодинамическим параметрам.

Первым базовым уравнением в данной системе является закон сохранения масс, что применительно к узлу ГТД, а также к турбомашине в целом, может быть выражено как равенство сумм расхода компонент входящих в узел, и выходящих из узла. Предпочтительно использовать массовые величины расходов:

$$\sum_{i=1}^m G_i^{input} = \sum_{j=1}^n G_j^{output}, \quad (14)$$

где G_i^{input} , G_j^{output} , кг/с — расход компонент массовый на установившихся режимах входящих и выходящих из узла; m и n — число компонент.

Закон сохранения энергии для рабочего тела на установившемся режиме в каждом узле ГТД можно представить как равенство приращения энтальпии рабочей среды по параметрам заторможенного потока за единицу времени наблюдения сумме действующих на рабочее тело механической и тепловой мощностей:

$$\sum_{j=1}^m i_{j\ output}^* \cdot G_j^{output} - \sum_{i=1}^n i_{i\ input}^* \cdot G_{input} = Q + N, \quad (15)$$

где для рабочего тела воздух или смесь остаточного воздуха и чистых продуктов сгорания принять $i^* = C_p T^*$, в этом случае механическая мощность подводимая к рабочему телу в компрессоре равна N_k .

Уравнение реального политропического процесса сжатия в компрессоре:

$$\frac{T_{output}^*}{T_{input}^*} = \pi_k^{*\frac{\kappa-1}{\kappa}} \eta_{nk} \quad (16)$$

и реального политропического процесса расширения в турбине:

$$\frac{T_{output}^*}{T_{input}^*} = \pi_m^* \frac{(1-\kappa)\eta_{nm}}{\kappa}, \quad (17)$$

где κ — истинный показатель адиабаты при средней температуре процесса

$$T_{cp} = \frac{T_{output}^* + T_{input}^*}{2};$$

$\eta_{пк}^*$, $\eta_{пт}^*$ — политропные КПД компрессоров и турбин.

Баланс мощностей на валу ГТД:

$$\left(\sum_{i=1}^{m_T} N_{Ti} \right) \eta_{mex.j} - \sum_{i=1}^{m_K} N_{ki} = N_{ej}, \quad (18)$$

где m_T — число турбин; m_K — число компрессоров на данном валу; N_e — полезная мощность, снимаемая с вала; $\eta_{mex.j}$ — механический КПД который учитывает потери мощности в опорах двигателя. Дифференциальная диагностика камеры сгорания предложенная в работах [5, 7, 13] в настоящее время на предприятии не внедрена.

Методика проведения измерений для внедрения дифференциальной (поэлементной) диагностики элементов двигателя

Перспективным направлением развития методов дифференциальной диагностики является оснащение стенда датчиками давления и температуры в ступенях турбомашин, а в дальнейшем и в КС. В качестве примера дифференциальной диагностики ступеней осевого компрессора (ОК) можно привести измерения давления и температуры за ступенями КНД двигателя ДГ90.

Авторами данной работы разработана методика и система измерения давления P_i^* , P_{i+1}^* и температуры T_i^* , T_{i+1}^* на входе и выходе ступени ОК, где i — номер ступени ОК. Для сбора вышеперечисленных диагностических параметров на корпусе КНД с минимальными доработками монтируются перемещаемые по высоте ступени поверенные средства измерения полного и статического давления, полной температуры. Измерение расхода воздуха через входное устройство ГТД будет произведено с помощью трубок Пито-Прандтля смонтированных на переднем корпусе двигателя и подсоединенных к U образным стеклянным трубкам заполненным дистиллированной водой. С установленными дополнительными датчиками двигатель монтируется на испытательный стенд. Сбор данных будет происходить в процессе проведения предъявительских испытаний. При этом измерения проводятся как на режимах частичной мощности, так и на

номинальном режиме. С целью получения более точных результатов замера, двигатель будет выдержан на каждом стационарном режиме не менее 5 минут.

Обработка результатов

Обработка измеренных диагностических параметров проводится в следующей последовательности.

1. Определяется удельная работа сжатия в ступени L_{ik}

$$L_{ik} = C_p (T_{i+1,k}^* - T_{ik}^*), \text{ кДж/кг}, \quad (19)$$

где C_p — истинная изобарная теплоемкость при средней температуре процесса, $T_{cp} = (T_{i+1}^* + T_i^*)/2$, i — номер ступени, k — номер режима по числу оборотов ротора n_k и по расходу воздуха через ступень G_{ik} .

2. Теоретическая удельная работа сжатия в ступени (теоретический напор) H_{ik}

$$H_{ik} = C_p T_{ik}^* \left(\left(\frac{P_{i+1,k}^*}{P_{i,k}^*} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right), \text{ Дж/кг}. \quad (20)$$

3. Мощность затрачиваемая на сжатие воздуха в ступени

$$N_{ik} = G_{ik} L_{ik}, \text{ кВт}.$$

4. Коэффициент полезного действия (КПД) ступени ОК по параметрам торможения

$$\eta_{ik}^* = \frac{H_{ik}}{L_{ik}}. \quad (21)$$

5. Проводится построение фрагмента универсальной характеристики ступени компрессора на режимах частичной мощности двигателя по измерениям параметров P_{ik}^* , P_{ik+1}^* , T_{ik}^* , T_{ik+1}^* , что дает возможность по формулам (п. 1-4). При этом расход воздуха G_b на каждом режиме определяется по измерению статического и полного давления воздуха в сечениях входного устройства, а скорость вращения ротора измеряется штатными датчиками оборотов.

6. Коэффициент технического состояния ступени ОК по КПД определяется на номинальном режиме

$$K_{\eta}^* = \frac{\eta_{i_0}^*}{\eta_{i_0}^*}, \quad (22)$$

где $\eta_{i_0}^*$ — коэффициент полезного действия ступени ОК, который определяется на начальном этапе эксплуатации двигателя или находится для современного уровня развития компрессоростроения (политропный КПД на уровне 0,9...0,91).

Заключение

1. Испытательный стенд ПАО «ТМ» оснащен современными системами: автоматического управления, вибрационного и параметрического контроля, а также приборами для диагностики ГТД интегральными методами.
2. Разработана и внедрена информационная система дифференциальной поузловой диагностики ГТД применительно к приемо-сдаточным испытаниям на ремонтном предприятии.
3. Разработан алгоритм определения коэффициентов технического состояния ступеней осевых компрессоров, предназначенных для использования в перспективной поэлементной диагностике элементов, узлов газотурбинного двигателя.
4. Проведена модернизация системы измерений и разработана методика определения результатов, позволяющие диагностировать параметры осевых компрессорных ступеней двигателя на режимах частичной и полной мощности, а также по данным испытаний ГТД на стенде предприятия, и в условиях эксплуатации на компрессорных станциях, строить характеристики ступеней, определять коэффициент технического состояния ступеней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекнев В. С. Газовая динамика: Учебник для вузов / В. С. Бекнев, А. И. Леонтьев, А. Б. Шабаров и др. М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. 671 с.
2. Белов М. С. Термогазодинамическая диагностика трехвальных приводных газотурбинных двигателей: дисс. ... канд. тех. н. / М. С. Белов. 2010. 128 с.
3. Белов М. С. Экспериментальное исследование термогазодинамических параметров газотурбинных двигателей (научное издание) / М. С. Белов. Тюмень: Сити-Пресс, 2010. 40 с.
4. Белов М. С. Параметрическая диагностика газотурбинных двигателей (научное издание) / М. С. Белов, А. Б. Шабаров. Тюмень: ТГНГУ, 2010. 40 с.
5. Белов М. С. Разработка и внедрение системы диагностики мощности и эффективности двигателя в условиях приемо-сдаточных испытаний / М. С. Белов, А. Б. Шабаров // Сборник статей. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2007. С. 93-103.
6. Белов М. С. Расчетно-теоретическое исследование термогазодинамических параметров (научное издание) / М. С. Белов, А. Б. Шабаров. Тюмень: Сити-Пресс, 2010. 40 с.
7. Белов М. С. Термогазодинамическая диагностика газотурбинных двигателей компрессорных станций / М. С. Белов, А. Б. Шабаров // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2008. № 6. С. 49-55.
8. Зарицкий С. П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом / С. П. Зарицкий. М.: Недра, 1987. 197 с.

9. Зарицкий С. П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов. Части 1-5 / С. П. Зарицкий, А. С. Лопатин. М.: Изд. РГУ им. И. М. Губкина, 2003.
10. Кицало А. Я. Программа-методика испытаний серийных изделий ДГ90-П1, ДГ90-Л2 / А. Я. Кицало, Е. Б. Аникеенко. Николаев: ГП НПКГ «Зоря» — «Машпроект», 1997. 62 с.
11. Кульчихин В. Г. Стендовые испытания приводов ГПА в условиях ремонтного предприятия: монография / В. Г. Кульчихин, В. М. Шабает, И. В. Гагарин, М. К. Леонтьев, О. Ю. Потапова. Тюмень: Тюменские моторостроители, 2006. 160 с.
12. Лобанов Е. Н. Стенд испытательный техническое описание / Е. Н. Лобанов. Николаев: ГП НПКГ «Зоря» — «Машпроект», 2000. 102 с.
13. Методика прогнозирования тренда параметров технического состояния ГПА компрессорных станций на основе термогазодинамического диагностирования узлов / А. Б. Шабаров, С. В. Михайленко // Проблемы магистрального и промышленного транспорта углеводородов. Тюмень: ТюмГНГУ, 2000.

Alexander B. SHABAROV¹

Alexander M. MOISEEV²

Mikhail S. BELOV³

Andrey A. ACHIMOV⁴

UDC 662.5

INFORMATION SYSTEM OF THE TEST BENCH FOR DRIVING GAS TURBINE ENGINES

¹ Dr. Sci. (Tech.), Professor,
Department of Applied and Technical Physics,
University of Tyumen
kaf_mms@utmn.ru

² Head of the Bureau of Operational Monitoring
and Control of the Technical Department, Tyumen Motorostroitel
almoiseev1@rambler.ru; ORCID: 0000-0003-2022-8849

³ Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
Department of Applied and Technical Physics,
Institute of Industrial Technologies and Engineering,
Industrial University of Tyumen;
Deputy Foreman, Workshop No. 35,
Tyumen Motorostroitel
belovms.gts@gmail.com

⁴ Manufacturing Engineering Supervisor,
Workshop No. 35, Tyumen Motorostroitel
andrew.achimov@gmail.com

Abstract

This article studies the problem of determining the technical condition of drive and energetic gas turbine engines (GTE) during acceptance tests that have been repaired at a specialized enterprise. The following descriptions are given: of the bench for testing drive and energetic

Citation: Shabarov A. B., Moiseev A. M., Belov M. S., Achimov A. A. 2020. "Information system of the test bench for driving gas turbine engines". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 6, no. 4 (24), pp. 28-47.
DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-4-28-47

gas turbine engines; of the bench systems for monitoring and measurement, methods for conducting acceptance tests; of the evaluation the quality of the repaired engine based on its thermogasdynamics parameters; of the processing of measurement results obtained during acceptance tests. The materials of the system of differential (subassembly) diagnostics of GTE are generalized. The authors have considered the features of diagnostics of transient modes of GTE. The authors suggest the transition from the engine node to its elements as one of the ways to further improve the differential diagnostics, which has required developing the technique and system of pressure and temperature measurement at inlet and outlet of stage axial compressor. An algorithm for differential (element-by-element) engine diagnostics is described using the example of an axial compressor stage.

Keywords

Gas-turbine engine, acceptance tests, control system, differential diagnostics of components and elements, nodal parameters, multistage axial flow compressor.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-4-28-47

REFERENCES

1. Beknev V. S., Leontiev A. I., Shabarov A. B. et al. 1997. Gas Dynamics: Textbook for Higher Education Institutions. Moscow: Bauman Moscow State Technical University. 671 pp. [In Russian]
2. Belov M. S. 2010. "Thermodynamic diagnostics of the three-shaft drive gas turbine engines". Cand. Sci. (Tech.) diss. 128 pp. [In Russian]
3. Belov M. S. 2010. Experimental Study of Thermogasodynamic Parameters of Gas Turbine Engines. Tyumen: Sity-Press. 40 pp. [In Russian]
4. Belov M. S., Shabarov A. B. 2010. Parametric Diagnostics of the Gas Turbine Engines. Tyumen: TGNSU. 40 pp. [In Russian]
5. Belov M. S., Shabarov A. B. 2007. "Development and implementation of a system for diagnostics of engine power and efficiency in the conditions of acceptance tests". Collected Papers, pp. 93-103. Tyumen: UTMN Publishing House. [In Russian]
6. Belov M. S., Shabarov A. B. 2010. Computational and Theoretical Study of Thermogasodynamic Parameters. Tyumen: Sity-Press. 40 pp. [In Russian]
7. Belov M. S., Shabarov A. B. 2008. "Thermogasodynamic diagnostics of gas turbine engines of compressor stations". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, no. 6, pp. 49-55. [In Russian]
8. Zaritsky S. P. 1987. Diagnostics of Gas Pumping Units with a Gas Turbine Engine. Moscow: Nedra. 197 pp. [In Russian]
9. Zaritsky S. P., Lopatin A. S. 2003. Diagnostics of Gas Pumping Units. Vols. 1-5. Moscow: Publishing House of Gubkin Russian State University. [In Russian]
10. Kittsalo A. Ia., Anikeenko E. B. 1997. Program-Method of Testing of Serial Products DG90P1, DG90L2. Nikolaev: "Zorya — Mashproekt". 62 pp. [In Russian]

11. Kulchihin V. G., Shabaev V. M., Gagarin I. V., Leontyev M. K., Potapova O. Ju. 2006. Bench Tests of Drives of Gas Pumping Units in the Conditions of a Repair Enterprise: Monograph. Tyumen: Tyumen Motorostroitel. 160 pp. [In Russian]
12. Lobanov E. N. 2000. Test Stand Technical Description. Nikolaev: Zorya — Mashproekt. 102 pp. [In Russian]
13. Shabarov A. B., Mikhailenko S. V. 2000. “Method for predicting the trend of parameters of the technical condition of compressor stations based on thermogasodynamic diagnostics of nodes”. In: Problems of Mainline and commercial Transport of Hydrocarbons. Tyumen: TSOGU. [In Russian]