

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОМИНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТУРБИННОГО ПРИВОДА ГТЭ-6,3/МС ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЯМКИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

¹Чекардовский М.Н., ²Илюхин К.Н., ¹Куликов А.М., ³Ващилин В.В.

¹ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, Россия, (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д.38), e-mail: zemenkov@tsoгу.ru,

²ФГБОУ ВО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет», Тюмень, Россия, (625001, Тюмень, ул. Луначарского, д. 2), e-mail: ktgv@tgasu.ru

³ООО «Газпром трансгаз Сургут» ИТЦ, Сургут, Россия, (628400, Сургут, ул. Промышленная 27).

Статья содержит методический материал позволяющий решить одну из актуальнейших проблем эксплуатации систем подготовки и транспорта углеводородного сырья. Проблема заключается в достоверном определении технического состояния и качества ремонта энергетического оборудования служащего не только для обеспечения технологических нужд, но и для реализации задач программы энергосбережения в части утилизации попутного нефтяного газа. В статье предложена методика расчета номинальных параметров газотурбинных двигателей (ГТД) ГТЭ-6,3/МС, установленных на теплоэлектростанции «Мотор Сич ЭГ 6000Т-Т10500-3ВН М1УХЛ1», источником топлива которой является попутный нефтяной газ Тямкинского месторождения Уватского района, Тюменской области. Теплоэлектростанция используется для обеспечения собственных нужд систем подготовки и транспорта углеводородного сырья. На основе ограниченного количества номинальных параметров ГТД завода-изготовителя авторы разработали методику расчета номинальных параметров по всей проточной части двигателя.

Ключевые слова: номинальные параметры; газотурбинный двигатель; эффективная мощность; эффективный коэффициент полезного действия; метод итерации.

THE METHOD OF DETERMINING THE NOMINAL PARAMETERS OF GAS TURBINE DRIVE GTE-6,3/MS POWER PLANT OF OWN NEEDS TYAMKINSKOE FIELD

¹Chekardovskiy M. N., ²Ilyuhin K. N., ¹Kulikov A. M., ³Vashchilin V. V.

¹Tyumen State Oil and Gas University Tyumen, Russia, (625000, Tyumen, Volodarskogostreet, 38), e-mail: zemenkov@tsoгу.ru.

²Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Tyumen, Russia, (625001, Tyumen, Lunacharskogostreet, 2), e-mail: ktgv@tgasu.ru.

Gazprom Transgaz Surgut engineering and technical center, Surgut, Russia, (628400, Surgut, Promyishlennayastreet, 27)

The article contains methodical material which allows to solve one of actual problems of operation of systems of preparation and transportation of hydrocarbons. The problem lies in identification of technical condition and quality repair of power equipment of the employee not only to ensure technological needs, but also to realize the targets of energy saving program in terms of utilization of associated petroleum gas. In the article the methods of calculating the nominal parameters of gas-turbine engines (GTE) GTE-6,3/MS, installed at the power plant "Motor Sich EG 6000T-T10500-3VN M1UHL1", fuel is associated gas Tyamkinskoe field of the Uvat district, Tyumen region. The power plant is used for own needs of the system of preparation and transport of hydrocarbons. On the basis of a limited number of nominal parameters of GTE factory, the authors developed a method of calculating nominal parameters across a flowing part of the engine.

Keywords: nominal parameters; gas turbine engine; effective power; effective efficiency; method of iteration.

Анализ номинальных параметров проектируемых газотурбинных двигателей (ГТД) показывает, что заводы-изготовители предоставляют заказчику ограниченное количество номинальных параметров ГТД. В связи с этим несомненна актуальность результатов расчета номинальных параметров по всей проточной части двигателя. При проведении приёмочных испытаний ГТД у заказчика появляется возможность проверить соответствие фактических

номинальных параметров проектным параметрам и достоверно оценить техническое состояние ГТД. В свою очередь это позволит обеспечить надёжную работу систем подготовки и транспорта углеводородного сырья.

В статье представлены методика, алгоритм и результаты расчета номинальных параметров всей проточной части газотурбинного двигателя (ГТД) ГТЭ-6,3/МС, входящего в состав теплоэлектростанции (ТЭС) «Мотор Сич ЭГ 6000Т-Т10500-3ВН М1УХЛ1» изготовителя АО «Мотор Сич» г. Запорожье, Украина.

Исследование

Для обеспечения производственных процессов подготовки и транспорта углеводородного сырья на промплощадке Гямкинского месторождения предназначена теплоэлектростанция оснащенная газотурбинным двигателем, электрогенератором и котлом-утилизатором тепла продуктов сгорания, уходящих из силовой турбин.

Общий вид газотурбинного двигателя ГТЭ-6,3/МС представлен на рисунке 1.

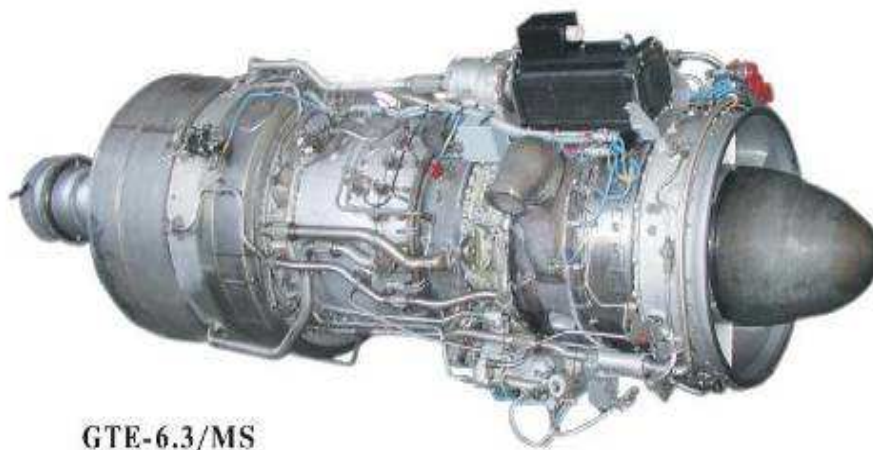


Рис. 1. Общий вид ГТЭ-6,3/МС

ГТД – трехвальный, предназначен для привода синхронного генератора электростанции, что обеспечивается передачей крутящего момента от ведущего вала свободной турбины через редуктор и валопровод с фрикционной и мембранной муфтами на вал генератора [5].

На рисунке 2 представлена принципиальная схема ГТД с номинальными термогазодинамическими параметрами.

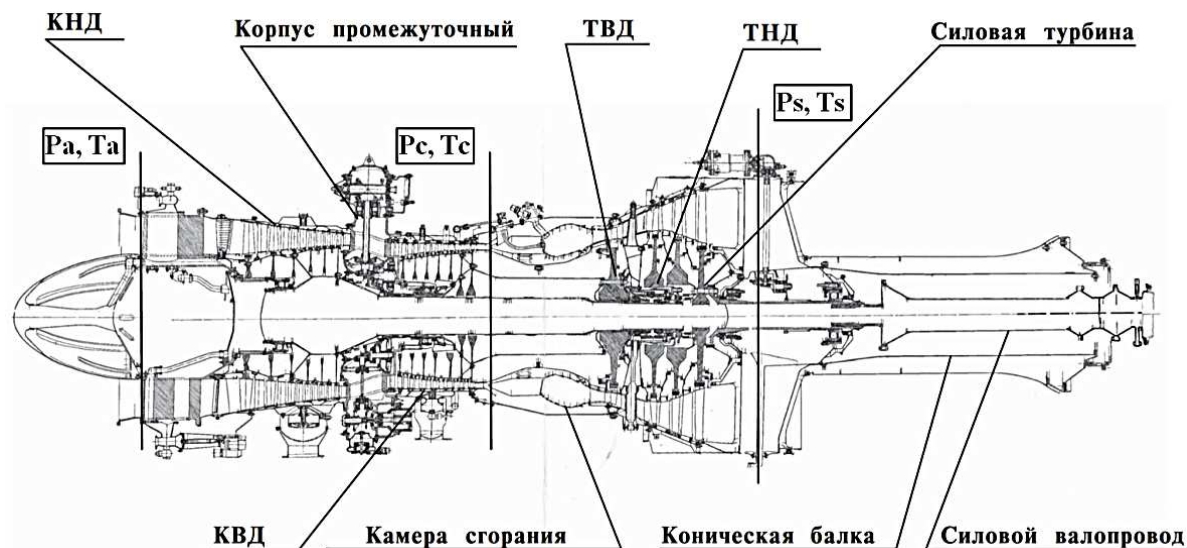


Рис. 2. Конструкционная схема ГТЭ-6,3/МС и схема измерения термодинамических параметров
 компрессор низкого давления (КНД); компрессор высокого давления (КВД);
 камера сгорания (КС); турбина высокого давления (ТВД); турбина низкого давления (ТНД);
 турбина силовая (ТС)

В таблице 1 представлено ограниченное количество номинальных параметров ГТД.

Таблица 1

Номинальные параметры ГТЭ-6,3/МС

№	Наименование	Размерность	Обозначение	Значение	Примечания
1	Эффективная мощность ГТД	кВт	N_e	6300	
2	Степень сжатия воздуха в ОК	-	$\epsilon_{ок}$	15,9	$\epsilon_{ок} = P_c / P_a$
3	Расход условного топлива на номинальном режиме в нормальных условиях	кг/с	$V_{у.т}$	0,4194	Низшая теплотворная способность условного топлива, $Q_{н.0}^p = 50056$ кДж/кг
3	Расход продуктов сгорания после ТС	кг/с	$M_{пс}$	32,1652	
4	Температура продуктов сгорания на выхлопе	К	T_s	704	
5	Потери давления на выходе турбины силовой	кПа	ΔP_s	1,52	
9	Эффективный КПД ГТД	-	η_e	0,31	
10	Номинальная температура воздуха перед КНД	К	T_a	288	
11	Номинальное давление воздуха перед КНД	кПа	P_a	101,33	

12	Давление воздуха после КВД	кПа	P _с	1611,15	P _с =P _а ·ε _{ок}
----	----------------------------	-----	----------------	---------	---

Для расчёта дополнительных параметров разработана методика и составлены уравнения по данным литературы [1, 2, 3, 4].

Расход воздуха:

$$M_6 = M_{nc} - B_{ном} = 32,1652 - 0,4552 = 31,71. \quad (1)$$

Номинальный расход реального топлива:

$$B_{ном} = B_{y.t} \cdot \frac{Q_{н.0}^p}{Q_n^p}, \quad (2)$$

где $Q_{н.0}^p = 50056$ кДж/кг (таблица 1) - теплотворная способность условного топлива; $Q_n^p = 46117$ кДж/кг - теплотворная способность реального топлива (попутный газ) Тямкинского месторождения Уватского района Тюменской области; $B_{y.t} = 0,4194$ кг/с - расход условного топлива на номинальном режиме в нормальных условиях при $T_a = 288K$, $P_a = 101,33$ кПа (таблица 1). Тогда:

$$B_{ном} = 0,4194 \cdot \frac{50056}{46117} = 0,4552 \text{ кг/с}$$

Теоретически необходимое количество воздуха на 1 кг топлива:

$$L_0 = \frac{Q_n^p}{2,9} = \frac{46117}{2900} = 15,902 \text{ кг/кг} . \quad (3)$$

Коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{M_B}{L_0 \cdot B} = \frac{31,71}{19,902 \cdot 0,4552} = 4,38 . \quad (4)$$

Температура продуктов сгорания на входе турбины силовой (T_с):

$$T_s = \frac{N_e}{M_{пс} \cdot C_{пс}} + T_s', \quad (5)$$

где $N_e = 6300$ кВт, $M_{пс} = 32,1652$ кг/с, $T_s = 704K$ (таблица 1).

В формуле (5) неизвестно среднее значение удельной теплоёмкости продуктов сгорания в интервале температур T_s (таблица 1) и T_s' .

Среднее значение удельной теплоёмкости продуктов сгорания:

$$C_{пс} = A + t \cdot 9,355 \cdot 10^{-5} + t^2 \cdot 3,7 \cdot 10^{-7} - t^3 \cdot 2,77 \cdot 10^{-10}, \quad (6)$$

где $A=1,031$ при значении коэффициента избытка воздуха $\alpha \leq 5$;

$t = (T_s' + T_s)/2 - 273$, °C- среднее значение температуры продуктов сгорания в турбине силовой.

Уравнение для C_p получено при аппроксимации графических зависимостей $C_{pm}=f(T, \alpha)$ [3].

Методом итерации (в диапазоне температур 800К-1000К) подбираем такое значение T_s' , чтобы принятое значение и расчетное имело расхождение до 1%. Принимаем $T_s'=870$ К. Тогда, при $t=(T_s' + T_s)/2 - 273 = 514$ °C:

$$C_{pnc} = 1,031 + 514 \cdot 9,355 \cdot 10^{-5} + 514^2 \cdot 3,7 \cdot 10^{-7} - 514^3 \cdot 2,77 \cdot 10^{-10} = 1,1391 \text{ кДж/кг} \cdot \text{°C}$$

Температура продуктов сгорания на входе ТС:

$$T_s' = \frac{N_e}{M_{ПС} \cdot C_{Pnc}} + T_s = \frac{6300}{32,1652 \cdot 1,1391} + 704 = 876 \text{ К.} \quad (7)$$

Расхождение принятого $T_s' = 870$ К и расчетного значения $T_s' = 876$ К:

$$\delta = ((876 - 870)/876) \times 100 = 0,69\% . \quad (8)$$

Для дальнейших расчетов $T_s' = 876$ К.

Температура за компрессором высокого давления (КВД):

$$T_c = \left(\frac{P_c}{P_a} \right)^{\frac{n_{ок} - 1}{n_{ок}}} \cdot T_a = \left(\frac{1611,15}{101,33} \right)^{\frac{1,5 - 1}{1,5}} \cdot 288 = 724 \text{ К} , \quad (9)$$

где $n_{ок} = 1,5$ - принятое значение коэффициента политропного процесса повышения давления воздуха в осевом компрессоре; P_c - абсолютное давление воздуха за КВД $P_c = P_a \cdot \epsilon_{ок} = 101,33 \cdot 15,9 = 1611,15 \text{ кПа}$, где $\epsilon_{ок}$ - степень повышения давления в осевом компрессоре (ОК), (таблица 1); P_a - номинальное давление на входе ОК, кПа (таблица 1).

Мощность ОК (КНД+КВД):

$$N_{ок} = M_g \cdot C_{p_g} \cdot (T_c - T_a) = 31,71 \cdot 1,0694 \cdot (724 - 288) = 14785 \text{ кВт}, \quad (10)$$

где C_{p_g} - теплоёмкость воздуха при $t = (T_c + T_a)/2 - 273 = (724 + 288)/2 - 273 = 233$ °C.

$$C_{pв} = 1,031 + 233 \cdot 9,355 \cdot 10^{-5} + 233^2 \cdot 3,7 \cdot 10^{-7} - 233^3 \cdot 2,77 \cdot 10^{-10} = 1,0694 \text{ кДж/кг} \cdot \text{°C}$$

Из баланса мощностей:

$$1,015(N_{ок}) = N_{твд} + N_{тнд} = M_{nc} \cdot C_{pnc} \cdot (T_z - T_s'), \quad (11)$$

где: $N_{твд}$ и $N_{тнд}$ - мощности, соответственных турбин.

Тогда температура продуктов сгорания перед ТВД

$$T_z = \frac{1,015 \cdot N_{ок}}{M_{nc} \cdot C_{pnc}} + T_s' = \frac{1,015 \cdot 14785}{32,1652 \cdot 1,2005} + 876 = 1265 \text{ К}, \quad (12)$$

где, исходя из вышеуказанного метода итерации принимаем $T_z = 1270$ К и определяем $t = (T_z + T_s')/2 - 273 = (1270 + 876)/2 - 273 = 800$ °C. Тогда:

$$C_{Pnc}=1,031+800\cdot 9,355\cdot 10^{-5}+800^2\cdot 3,7\cdot 10^{-7}-800^3\cdot 2,77\cdot 10^{-10}=1,2005 \text{ кДж/кг}\cdot\text{°C}.$$

Для дальнейших расчетов $T_z = 1265\text{K}$.

Мощность турбины:

$$N_{(ТВД+ТНД+СТ)} = M_{nc} \cdot C_{Pnc} \cdot (T_z - T_s) = 32,1652 \cdot 1,1847 \cdot (1265 - 704) = 21377,53 \text{ кВт}, \quad (13)$$

где C_{Pnc} - теплоёмкость воздуха при $t = (T_z + T_s)/2 - 273 = (1264 + 704)/2 - 273 = 711\text{°C}$:

$$C_{Pv}=1,031+711\cdot 9,355\cdot 10^{-5}+711^2\cdot 3,7\cdot 10^{-7}-711^3\cdot 2,77\cdot 10^{-10} = 1,1847\text{кДж/кг}\cdot\text{°C}.$$

Проверка:

$$N_{\text{ерассч.}} = N_{(ТВД+ТНД+СТ)} - N_{(ТВД+ТНД)} = 21377,53 - 15016 = 6362 \text{ кВт}$$

где $N_{ТВД} + N_{ТНД} = M_{nc} \cdot C_{Pnc} \cdot (T_z - T'_s) = 32,1652 \cdot 1,2001(1265 - 876) = 15016 \text{ кВт}$;

где $t = (T_z + T'_s)/2 - 273 = (1265 + 876)/2 - 273 = 794,5\text{°C}$. Тогда:

$$C_{Pnc}=1,03+794,5\cdot 9,355\cdot 10^{-5}+794,5^2\cdot 3,7\cdot 10^{-7}-794,5^3\cdot 2,77\cdot 10^{-10}=1,2 \text{ кДж/кг}\cdot\text{°C}$$

Расхождение номинальной эффективной мощности ГТД $N_e = 6300 \text{ кВт}$ и расчетной эффективной мощности ГТД $N_{\text{ерассч.}} = 6362 \text{ кВт}$:

$$\delta_N = \frac{N_{\text{ерассч.}} - N_e}{N_{\text{ерассч.}}} \cdot 100 = \frac{6362 - 6300}{6362} \cdot 100 = 0,98 \% . \quad (14)$$

КПД камеры сгорания определим по формуле:

$$\eta_{kc} = \frac{L_0 \cdot C_{pv} \cdot (T_z - T_c) \cdot \alpha}{Q_H^P} = \frac{15,902 \cdot C_{Pcm} \cdot (1265 - 724) \cdot 4,38}{46117} = 0,973, \quad (15)$$

где, при значении $t = (T_z + T_c)/2 - 273 = (1265 + 724)/2 - 273 = 721,5\text{°C}$:

$$C_{Pcm}=1,03721,5\cdot 9,355\cdot 10^{-5}+721,5^2\cdot 3,7\cdot 10^{-7}-721,5^3\cdot 2,77\cdot 10^{-10}=1,1904 \text{ кДж/кг}\cdot\text{°C}.$$

Эффективный КПД агрегата:

$$\eta_{\text{ерассч.}} = \frac{N_{\text{ерассч.}}}{Q_H^P \cdot B_{\text{ном}}} = \frac{6362}{46117 \cdot 0,4552} = 0,303. \quad (16)$$

Проверка расчёта:

$$\delta = \frac{\eta_e - \eta_{\text{ерассч.}}}{\eta_e} \cdot 100\% = \frac{0,31 - 0,303}{0,31} \cdot 100\% = 2,25\% . \quad (16a)$$

Баланс мощностей:

$$N_{ТВД+ТНД+ТС} = 1,015N_{OK} + N_e = 1,015 \cdot 14785 + 6362 = 21369 \text{ кВт} . \quad (17)$$

Проверку расчёта проводим по формуле:

$$\delta = \frac{N_{ТВД+ТНД+ТС} - N_{ТВД+ТНД+ТС}}{N_{ТВД+ТНД+ТС}} \cdot 100 = \frac{21377 - 21369}{21377} \cdot 100 = 0,04\% . \quad (18)$$

Давление продуктов сгорания после ТС:

$$P_s = P_a + \Delta P_s = 101,33 + 1,52 = 102,85 \text{ кПа} . \quad (19)$$

Коэффициент политропного расширения продуктов сгорания:

$$n_t = \frac{1}{1 - \frac{\lg T_z / T_s}{\lg P_z / P_s}} = \frac{1}{1 - \frac{\lg 1265 / 704}{\lg 1546,7 / 102,85}} = 1,2759 \quad , \quad (20)$$

где $P_z = P_c \cdot \sigma_{kc} = 1611,15 \cdot 0,96 = 1546,7$ кПа, $\sigma_{kc} = 0,96 \div 0,98$ - коэффициент гидравлического сопротивления камеры сгорания [1, 2].

Давление продуктов сгорания перед ТС:

$$P_s = P_s \left(\frac{T_s}{T_s} \right)^{\frac{n_t}{n_t-1}} = 102,85 \left(\frac{876}{704} \right)^{\frac{1,2579}{1,2579-1}} = 298,7 \text{ кПа.} \quad (21)$$

Коэффициент политропного процесса повышения давления воздуха в осевом компрессоре:

$$n_{ок} = \frac{1}{1 - \frac{\lg T_c / T_a}{\lg P_c / P_a}} = \frac{1}{1 - \frac{\lg 724 / 288}{\lg 1611,15 / 101,33}} = 1,498. \quad (22)$$

Принимаем температуру за КНД равной $T_c = 388$ К. Тогда

$$P_{c1} = P_a \left(\frac{T_c}{T_a} \right)^{\frac{n_{ок}}{n_{ок}-1}} = 101,33 \left(\frac{388}{288} \right)^{\frac{1,498}{1,498-1}} = 248,35 \text{ кПа.} \quad (23)$$

Проверка принятого значения T_c по данным КВД:

$$P_{c2} = \frac{P_c}{\left(\frac{T_c}{T_c} \right)^{\frac{n_{ок}}{n_{ок}-1}}} = \frac{1611,15}{\left(\frac{724}{388} \right)^{\frac{1,498}{1,498-1}}} = 246,75 \text{ кПа.} \quad (24)$$

Из полученных значений выбираем среднее значение давления:

$$P_{cср} = (P_{c1} + P_{c2}) / 2 = (248,35 + 246,75) / 2 = 247,55 \text{ кПа}$$

$$T_c = T_a \left(\frac{P_{cср}}{P_a} \right)^{\frac{n_{ок}-1}{n_{ок}}} = 288 \left(\frac{247,55}{101,33} \right)^{\frac{1,498-1}{1,498}} = 387,6 \text{ К.} \quad (25)$$

Для дальнейших расчетов $T_c = 387,6$ К.

При значении коэффициента адиабатного процесса повышения давления воздуха ($\kappa = 1,4$) в осевом компрессоре:

$$T_{c.ад} = T_a \left(\frac{P_{cср}}{P_a} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 288 \left(\frac{247,55}{101,33} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 371,73 \text{ К.} \quad (26)$$

Мощности отдельных узлов (КНД, КВД, ТНД, ТВД):

КНД: индикаторная

$$N_{кнд} = M_g \cdot C_{Pв} \cdot [T'_c - T_a] = 31,71 \cdot 1,0386 \cdot [387,6 - 288] = 3293,4 \text{ кВт},$$

где при $t = (T'_c + T_a)/2 - 273 = (387,6 + 288)/2 - 273 = 64,8^\circ\text{C}$:

$$C_{Pв} = 1,031 + 64,8 \cdot 9,355 \cdot 10^{-5} + 64,8^2 \cdot 3,7 \cdot 10^{-7} - 64,8^3 \cdot 2,77 \cdot 10^{-10} = 1,0386 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C};$$

адиабатная

$$N_{кнд.ад} = M_g \cdot C_{Pв} \cdot [T'_{c.ад} - T_a] = 31,71 \cdot 1,0375 \cdot [371,73 - 288] = 2655,1 \text{ кВт},$$

где при $t = (T_{c.ад}' + T_a)/2 - 273 = (371,73 + 288)/2 - 273 = 56,86^\circ\text{C}$:

$$C_{Pв} = 1,031 + 56,86 \cdot 9,355 \cdot 10^{-5} + 56,86^2 \cdot 3,7 \cdot 10^{-7} - 56,86^3 \cdot 2,77 \cdot 10^{-10} = 1,0375 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}.$$

КПД КНД:

$$\eta_{кнд} = \frac{N_{кнд.ад}}{N_{кнд}} = \eta_{кнд} = \frac{2655,1}{3293,4} = 0,8062. \quad (27)$$

КВД: индикаторная

$$N_{квд} = M_g \cdot C_{Pв} \cdot [T_c - T'_c] = 31,71 \cdot 1,0807 \cdot [724 - 387,6] = 11528,1 \text{ кВт},$$

где при $t = (T_c + T'_c)/2 - 273 = (724 + 387,6)/2 - 273 = 282,8^\circ\text{C}$:

$$C_{Pв} = 1,031 + 282,8 \cdot 9,355 \cdot 10^{-5} + 282,8^2 \cdot 3,7 \cdot 10^{-7} - 282,8^3 \cdot 2,77 \cdot 10^{-10} = 1,0807 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}.$$

При значении коэффициента адиабатного процесса повышения давления воздуха ($\kappa = 1,4$) в осевом компрессоре:

$$T_{c.ад} = \left(\frac{P_c}{P'_c} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot T'_{c.ад} = \left(\frac{1611,15}{247,55} \right)^{1,4} \cdot 371,73 = 634,8 \text{ K}, \quad (28)$$

адиабатная

$$N_{квд.ад} = M_g \cdot C_{Pв} \cdot [T_{c.ад} - T'_{c.ад}] = 31,71 \cdot 1,069 \cdot [634,8 - 371,73] = 8916,7 \text{ кВт},$$

где при $t = (T_{c.ад} + T'_{c.ад})/2 - 273 = (634,8 + 371,73)/2 - 273 = 230,3^\circ\text{C}$:

$$C_{Pв} = 1,031 + 230,3 \cdot 9,355 \cdot 10^{-5} + 230,3^2 \cdot 3,67 \cdot 10^{-7} - 230,3^3 \cdot 2,77 \cdot 10^{-10} = 1,069 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C};$$

индикаторный КПД КВД

$$\eta_{квд} = \frac{N_{квд.ад}}{N_{квд}} = \frac{8916,7}{11528,1} = 0,773. \quad (29)$$

Проверку расчёта проводим по формулам 30 и 31:

$$N_{квд} + N_{кнд} = N_{ок} = 11528,1 + 3293,4 = 14821,5 \text{ кВт}, \quad (30)$$

$$\delta = \frac{N_{ок} - N_{ок}}{N_{ок}} \cdot 100 = \frac{14821,5 - 14785}{14821,5} \cdot 100 = 0,01\%. \quad (31)$$

Температура продуктов сгорания за ТВД:

$$T_z = T_z - \frac{1,015 \cdot N_{квд}}{M_{пс} \cdot C_{пс}} = 1265 - \frac{1,015 \cdot 11528,1}{32,1652 \cdot 1,2063} = 963,4 \text{ K}, \quad (32)$$

где, исходя из вышеуказанного метода итерации принимаем $T'_z=964\text{K}$ и определяем

$$t = (T_z + T'_s)/2 - 273 = (1265 + 964)/2 - 273 = 841,5^\circ\text{C}.$$

Тогда:

$$C_{Pnc} = 1,031 + 841,5 \cdot 9,355 \cdot 10^{-5} + 841,5^2 \cdot 3,7 \cdot 10^{-7} - 841,5^3 \cdot 2,77 \cdot 10^{-10} = 1,2063 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Для дальнейших расчетов $T'_z=964\text{K}$.

Давление продуктов сгорания за ТВД в политропном процессе:

$$P'_z = \frac{P_z}{\left(\frac{T_z}{T'_z}\right)^{\frac{n_t}{n_t-1}}} = \frac{1546,7}{\left(\frac{1265}{964}\right)^{\frac{1,2759}{1,2759-1}}} = 440,2 \text{ кПа}, \quad (33)$$

Давление продуктов сгорания в адиабатном процессе ($\kappa_t=1,3$):

$$\text{за ТВД} \quad T'_{z.ad} = \left(\frac{P'_z}{P'_s}\right)^{\frac{\kappa_t-1}{\kappa_t}} \cdot T'_s = \left(\frac{440,2}{298,57}\right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} \cdot 876 = 958,11 \text{ К}, \quad (34)$$

$$\text{за ТНД} \quad T'_{s.ad} = \frac{T'_{z.ad}}{\left(\frac{P'_z}{P'_s}\right)^{\frac{\kappa_t-1}{\kappa_t}}} = \frac{958,11}{\left(\frac{440,2}{298,57}\right)^{\frac{1,3-1}{1,3}}} = 876 \text{ К}. \quad (35)$$

Мощности турбин (ТНД и ТВД) рассчитываем по формулам:

ТНД:

индикаторная:

$$N_{mнд} = M_{nc} \cdot C_{pnc} \cdot [T'_z - T'_s] = 32,1652 \cdot 1,1714 \cdot [964 - 876] = 3315,7 \text{ кВт},$$

где, при $t = (T'_z + T'_s)/2 - 273 = (964 + 876)/2 - 273 = 647^\circ\text{C}$:

$$C_{Pnc} = 1,031 + 647 \cdot 9,355 \cdot 10^{-5} + 647^2 \cdot 3,7 \cdot 10^{-7} - 647^3 \cdot 2,77 \cdot 10^{-10} = 1,1714 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}};$$

адиабатная:

$$N_{mнд.ad} = M_{nc} \cdot C_{pв} \cdot [T'_{z.ad} - T'_{s.ad}] = 32,1652 \cdot 1,1695 \cdot [958,11 - 876] = 3089 \text{ кВт},$$

где при $t = (T'_{z.ad} + T'_{s.ad})/2 - 273 = (958,11 + 876)/2 - 273 = 644^\circ\text{C}$:

$$C_{Pв} = 1,031 + 644 \cdot 9,355 \cdot 10^{-5} + 644^2 \cdot 3,67 \cdot 10^{-7} - 644^3 \cdot 2,77 \cdot 10^{-10} = 1,1695 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C};$$

индикаторный КПД ТНД:

$$\eta_{mнд} = \frac{N_{mнд.ad}}{N_{mнд}} = \frac{3088,6}{3315,7} = 0,932. \quad (36)$$

ТВД: индикаторная:

$$N_{ТВД} = M_{ПС} \cdot C_{Pnc} \cdot T_Z \cdot \left[1 - \left(\frac{P_Z}{P^*_Z} \right)^{\frac{1-n_T}{n_T}} \right] = 32,1652 \cdot 1,2174 \cdot 1265 \cdot \left[1 - \left(\frac{1546,7}{440,2} \right)^{\frac{1-1,2759}{1,2759}} \right] = 11786,6 \text{ кВт}, \quad (37)$$

где при $t = (T_Z - 273) = 1265 - 273 = 992^\circ\text{C}$:

$$C_{Pnc} = 1,031 + 992 \cdot 9,355 \cdot 10^{-5} + 992^2 \cdot 3,7 \cdot 10^{-7} - 992^3 \cdot 2,77 \cdot 10^{-10} = 1,2174 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}};$$

индикаторный КПД ТВД:

$$\eta_{ТНД} = \frac{N_{ТВД}}{N_{ТВД\text{ид}}} = \frac{1 - \left(\frac{P_Z}{P^*_Z} \right)^{\frac{1-n_T}{n_T}}}{1 - \left(\frac{P_Z}{P^*_Z} \right)^{\frac{1-K_T}{K_T}}} = \frac{1 - \left(\frac{1567}{440,2} \right)^{\frac{1-1,2759}{1,2759}}}{1 - \left(\frac{1567}{440,2} \right)^{\frac{1-1,3}{1,3}}} = 0,945. \quad (38)$$

Индикаторная мощность турбин (ТВД+ТНД):

$$N^*_T = N_{ТВД} + N_{ТНД} = 11786,6 + 3315,7 = 15102,3 \text{ кВт}. \quad (39)$$

Эффективная мощность ТС:

$$N_{eCT} = N^*_{ТВД+ТНД+СТ} - N^*_T = N_{eCT} = 21377,53 - 15102,3 = 6275,23 \text{ кВт}. \quad (40)$$

Проверка расчёта:

$$\delta = \frac{N_e - N_{eTC}}{N_e} \cdot 100\% = \frac{6300 - 6275}{6300} \cdot 100\% = 0,4\%. \quad (41)$$

Эффективный КПД агрегата:

$$\eta_{eTC} = \frac{N_{eTC}}{Q_H^P \cdot B_{ном}} = \frac{6275,23}{46117 \cdot 0,4552} = 0,299. \quad (42)$$

Проверка расчёта:

$$\delta = \frac{\eta_e - \eta_{eTC}}{\eta_e} \cdot 100\% = \frac{0,31 - 0,299}{0,31} \cdot 100\% = 3,55\%.$$

Для проверки достоверности разработанной методики определения термодинамических параметров проточной части газотурбинного привода ГТЭ-6,3/МС составлена таблица 2.

В таблице 2 приведены заводские и расчетные значения мощности и КПД узлов газотурбинного привода ГТЭ-6,3/МС: компрессора низкого давления (КНД); компрессора высокого давления (КВД); камеры сгорания (КС); турбины высокого давления (ТВД); турбины низкого давления (ТНД); турбины силовой (ТС).

Таблица 2

Заводские и расчетные значения мощности и КПД ГТЭ-6,3/МС

№	Наименование	Размерн	Обоз	Значения	Погреш-	Форм
---	--------------	---------	------	----------	---------	------

		ость	начен ие	завод- ские	расчет- ные	ность, %	ула
1	Эффективная мощность ГТД	кВт	N_e	6300	6362	0,98	14
					6275	0,4	41
2	Эффективный КПД ГТД	-	η_e	0,31	0,303	2,26	16
					0,299	3,55	42
3	Индикаторные мощности: КНД	кВт			$N_{кнд}$	-	-
					$N_{квд}$	-	-
					$N_{твд}$	-	-
					$N_{тнд}$	-	-
						-	-
4	Индикаторные КПД: КНД	-			$\eta_{кнд}$	-	-
					$\eta_{квд}$	-	-
					$\eta_{твд}$	-	-
					$\eta_{тнд}$	-	-
						-	-

После капитального ремонта необходимо провести испытания газотурбинного привода для определения номинальных параметров, отремонтированного, и сравнивать текущее значение параметров с номинальными параметрами этого агрегата, а не нового. Проверка по общим результирующим параметрам доказывает достоверность методики контроля номинальных параметров газотурбинного двигателя ГТЭ-6,3/МС. По изменению эффективной мощности и КПД ГТЭ-6,3/МС можно оценить изменение технического состояния в зависимости от регулирования режимов работы ГПА и (или) зарождения и развития неисправностей. Необходимо различать изменение N_e и η_e при регулировании режима работы и при появлении неисправности. Поэтому каждое исследование проводится при идентичных условиях: частота вращения роторов, температура наружного воздуха, режим работы генератора, отборы воздуха должны быть идентичными.

Заключение. Рассчитанные по разработанной методике параметры газотурбинного двигателя имеют погрешность в сравнении с заводскими данными не более 4% по КПД и 1% по мощности, что говорит о возможности применения разработанного алгоритма для целей контроля качества проводимых ремонтов и диагностики технического состояния газотурбинного двигателя ГТЭ-6,3/МС в условиях эксплуатации. Расширенный ряд определяемых параметров позволяет повысить достоверность и глубину диагностических исследований, что положительно сказывается на общей надёжности не только газотурбинного привода, но и всей системы подготовки и транспорта углеводородного сырья Тямкинского месторождения.

Список литературы

1. Поршаков Б. Н., Бикчентай Р. Н., Романов Б. А. Термодинамика и теплопередача (в технологических процессах нефтяной и газовой промышленности). - М.: Недра, 1987 - 351 с.

2. Чекардовский М. Н. Методология контроля и диагностики энергетического оборудования системы теплогазоснабжения. – СПб.: ООО «Недра», 2001. –145с.
3. Чекардовский М.Н., Чекардовский С.М., Илюхин К.Н. и др. Сравнительный анализ методик определения термогазодинамических параметров работы газоперекачивающих агрегатов. // Сб. докл. научн. – практ. конф., посвященной 30летию ТюмГАСА. – М: 2001. С. 459 – 472.
4. Чекардовский С.М.,Борисов А. Ю.Развитие методов анализа энергоэффективности основного оборудования газокompрессорных станций. Нефтегазовый терминал выпуск 7: сборник научных статей памяти профессора Н. А. Малюшина; под. общ. ред. Земенкова Ю. Д.. Тюмень, 2015. – 304 с. С. 24-26.
5. Шабаров А. Б., Шалай В. В., Акулов К. А.,Чекардовский С.М.Устройство и эксплуатация газотурбинных установок: учебное пособие. Под. общ. ред. Земенкова Ю. Д.Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – 434 с.

Рецензенты:

Земенков Ю. Д., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Транспорт углеводородного сырья» ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;
Торопов С. Ю.,д.т.н., профессор кафедры «Транспорт углеводородного сырья» ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.