

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

Расчет термогазодинамических параметров газотурбинных установок

ЦЕЛЬ: Научиться производить расчет термогазодинамических параметров газотурбинных двигателей (рис. 1) с целью качественного сравнения существующих методик определения эффективной мощности N_e , КПД η_e и выявления их применимости на практике в области диагностики газоперекачивающих агрегатов (рис. 2).

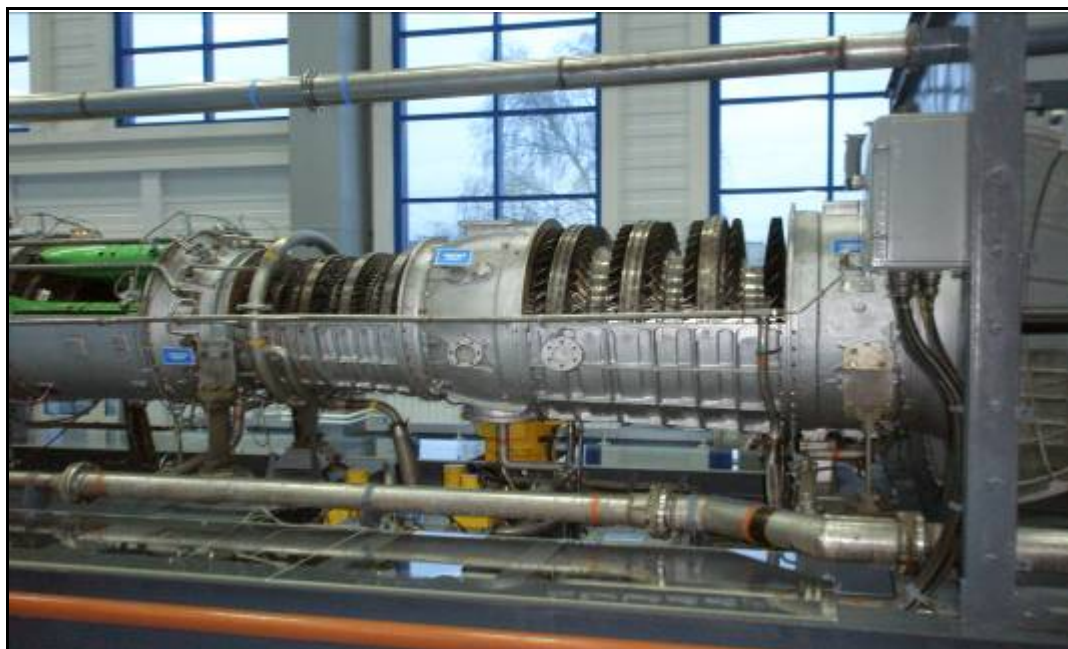
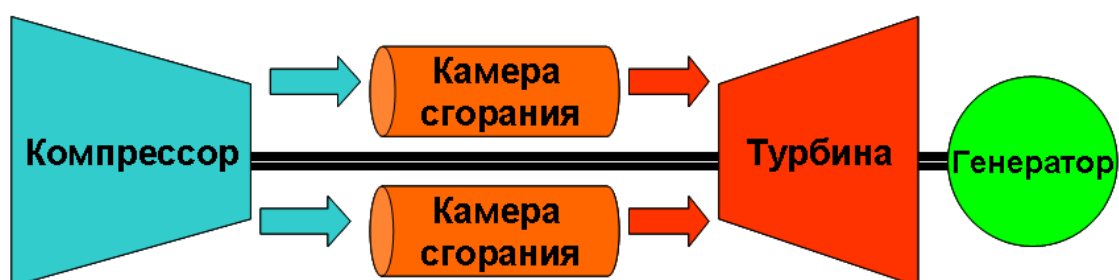


Рис. 1. Газотурбинный двигатель

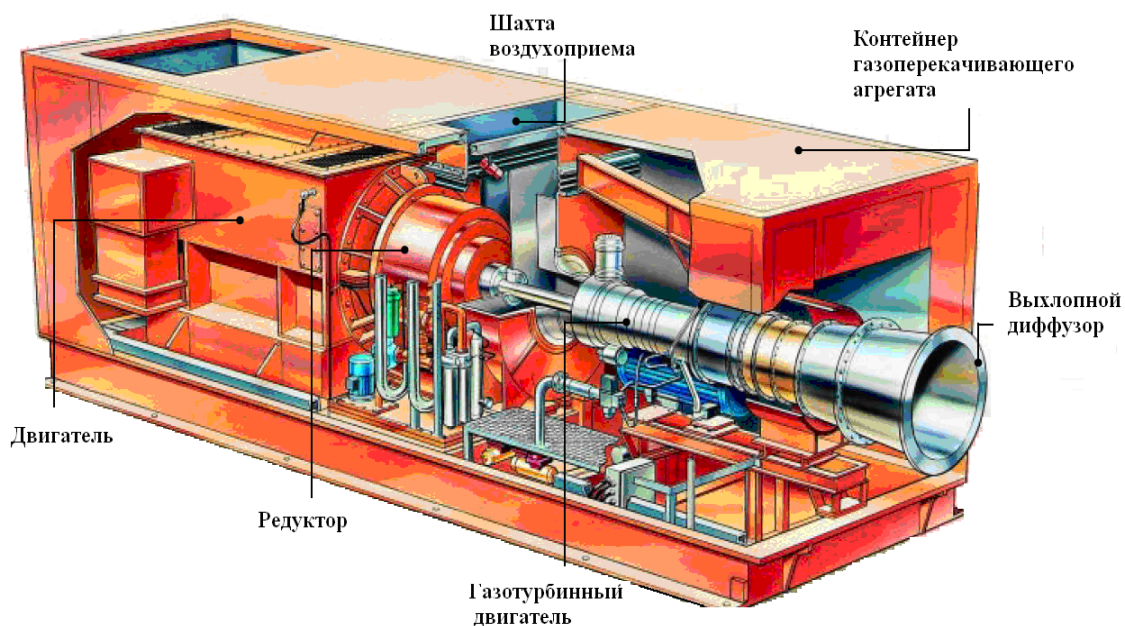


Рис. 2. Газоперекачивающий агрегат

В последние годы получают все более широкое применение в различных отраслях промышленности газотурбинные установки (ГТУ). Они могут работать на органическом топливе различного вида, что позволяет их использовать в стационарном (тепловые электрические станции, компрессорные станции и т.д.) и в транспортном варианте (морские суда, железнодорожный транспорт и т.д.).

На компрессорных станциях магистральных газопроводов ГТУ являются основными двигателями для привода газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Количество ГПА с газотурбинным приводом по суммарной мощности достигло 80% от общей установленной мощности приводов на газоконпрессорных станциях.

Перспективность использования ГТУ на компрессорных станциях связана с их высокой энергоемкостью, автономностью, не требующей подвода дополнительной энергии и большим моторесурсом. Компактность ГТУ позволяет производить их в блочно-модульном исполнении, что облегчает условия монтажа и технического обслуживания.

Основная особенность ГТУ заключается в существенной зависимости эксплуатационных характеристик от параметров термодинамического процесса горения топлива, которые в свою очередь зависят от качественного состава топлива, условий его подготовки и сгорания.

Термины, определения и область применения ГТУ



Машина, предназначенная для преобразования тепловой энергии в механическую называется **газотурбинным двигателем**.

Примечание – машина может состоять из одного или нескольких компрессоров, теплового устройства, в котором повышается температура рабочего тела, одной или нескольких газовых турбин, вала отбора мощности, системы управления и необходимого вспомогательного оборудования. Теплообменники в основном контуре рабочего тела, в которых реализуются процессы, влияющие на термодинамический цикл, являются частью газотурбинного двигателя.

Газотурбинная установка – это газотурбинный двигатель и все основное оборудование, необходимое для генерирования энергии в полезной форме.

Газотурбинные двигатель открытого цикла – это двигатель, в котором воздух поступает из атмосферы, а выхлопные газы отводятся в атмосферу.

Газотурбинные двигатель замкнутого цикла – это двигатель, в котором рабочее тело циркулирует по замкнутому контуру без связи с атмосферой.

Газотурбинный двигатель полужамкнутого цикла – это газотурбинный двигатель, в котором используется горение в рабочем теле, частично рециркулирующем и частично заменяемым атмосферным воздухом

Газотурбинный двигатель, термодинамический цикл которого состоит только из следующих друг за другом процессов сжатия, нагрева и расширения рабочего тела называется **газотурбинным двигателем простого цикла**.

Газотурбинные двигатель регенеративного цикла – это двигатель, термодинамический цикл которого отличается наличием регене-

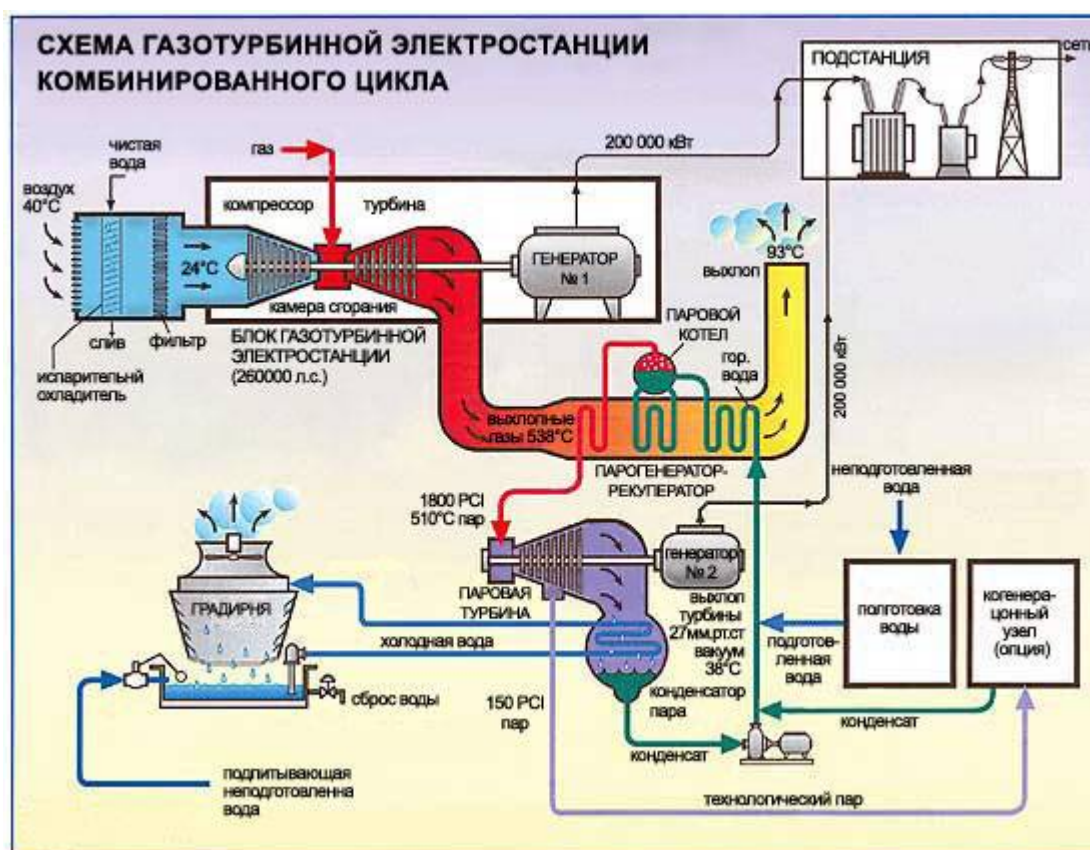
ративного охлаждения рабочего тела на выходе из газовой турбины и соответственно регенеративного подогрева воздуха за компрессором

Примечание – теплоту расширившегося в турбине газа используют для подогрева сжатого в компрессоре воздуха.

Газотурбинный двигатель, термодинамический цикл которого включает охлаждение рабочего тела в процессе его сжатия, называется **газотурбинным двигателем с циклом промежуточного охлаждения**.

Газотурбинный двигатель, термодинамический цикл которого включает подогрев рабочего тела в процессе его расширения, называется **газотурбинным двигателем с циклом промежуточного подогрева**.

Установка комбинированного цикла – это установка, термодинамический цикл которой включает комбинацию двух циклов, при которой теплота отработавших в газотурбинном двигателе газов в первом цикле используется для нагрева другого рабочего тела во втором цикле.



Одновальный газотурбинный двигатель – это двигатель, в котором роторы компрессора и газовой турбины соединены и мощность отбирается непосредственно с выходного вала или через редуктор.

Газотурбинный двигатель, имеющий, по крайней мере, две газовые турбины, вращающиеся на независимых валах, называется **многовальным**.

Газотурбинный двигатель, в котором для внешнего использования предусмотрен отбор сжатого воздуха между ступенями компрессора и/или на выходе из компрессора (горячего газа на входе в турбину и/или между ступенями турбины) называется **двигателем с отбором воздуха (газа)**.

Газогенератор – это комплекс компонентов газотурбинного двигателя, которые производят горячий газ под давлением для совершения какого-либо процесса или для привода силовой турбины.

Примечание – генератор газа состоит из одного или более компрессоров, устройств(а) для повышения температуры рабочего тела, одной или более турбин, приводящих компрессор(ы), системы управления и необходимого вспомогательного оборудования

Компрессор – это компонент газотурбинного двигателя, повышающий давление рабочего тела.

Газовая турбина – это компонент газотурбинного двигателя, преобразующий потенциальную энергию нагретого рабочего тела под давлением в механическую работу.

Силовая турбина – это турбина на отдельном валу, с которого отбирается выходная мощность.

Камера сгорания – это устройство газотурбинного двигателя для основного (промежуточного) подогрева рабочего тела.

Подогреватель рабочего тела – это устройство для подогрева поступающего в него рабочего тела без смешивания его с продуктами сгорания топлива.

Регенератор – это теплообменный аппарат, предназначенный для передачи теплоты отработавших в турбине газов рабочему телу.

Примечание - передача теплоты рабочему телу или воздуху перед его поступлением в камеру сгорания ГТД.

Датчик предельной температуры рабочего тела – это первичный чувствительный элемент системы управления ГТД, который непосредственно реагирует на изменение температуры и выходной сигнал которого воздействует через соответствующие усилители или преобразователи на систему защиты от предельного превышения температуры.

Теплота сгорания топлива – общее количество тепла, выделившегося при сгорании единицы массы топлива, кДж/кг.

Удельный расход теплоты – отношение теплоты сожженного в ГТД топлива за единицу времени к произведенной им мощности, кДж/кВт·ч.

Примечание - Удельный расход теплоты рассчитывают по низшей теплоте сгорания топлива при нормальных условиях.

Удельный расход топлива – отношение массового расхода топлива к выходной мощности ГТУ (ГТД), кг/кВт ч.

КПД – отношение выходной мощности к расходу теплоты топлива, подсчитанное по его низшей теплоте сгорания при нормальных условиях.

(Условная) температура на входе в турбину – Условная средняя температура рабочего тела непосредственно перед сопловыми лопатками первой ступени.

Режим (частота вращения) «самоходности» – режим (минимальная частота вращения выходного вала), при котором газотурбинный двигатель работает без использования мощности пускового устройства при наиболее неблагоприятных внешних условиях.

Режим (частота вращения) холостого хода – установленный изготовителем режим (частота вращения выходного вала), при котором газотурбинный двигатель может работать устойчиво и можно осуществлять нагружение или остановку.

Максимальная продолжительная частота вращения – это максимально допустимое при длительной эксплуатации значение частоты вращения выходного вала газотурбинного двигателя, с которого отбирается мощность.

Номинальная частота вращения вала – это частота вращения выходного вала газотурбинного двигателя, при которой определены его расчетные показатели.

Предельно допустимая частота вращения ротора – частота вращения ротора ГТД, при которой срабатывает аварийное устройство защиты для отсечки подачи топлива в газотурбинный двигатель и останова двигателя.

Условные обозначения и размерности величин

Q_{TG} – объёмный расход топливного газа, м³/ч;

ΔP – перепад давления на расходомере, МПа;

ρ_H – плотность газа при нормальных условиях, $\rho_H = 0,69$ кг/м³;

$V = G_m$ – массовый расход топливного газа, кг/с; кг/ч

F – площадь поперечного сечения выхлопного газотока, м²;

$T_S = T_T$ и $P_S = P_T$ – абсолютные температура и давление продуктов сгорания после Турбины низкого давления, К и МПа;

P_a – атмосферное давление воздуха, МПа;

T_a – температура наружного воздуха, К;

ρ_{15} – нормальная плотность воздуха, $\rho_{15} = 1,0226$ кг/м³;

$P_{ИЗБ}$ – избыточное давление воздуха, МПа;
 $T_Z = T_\Gamma$ – температура продуктов сгорания перед ТВД, К;
 α – коэффициент избытка воздуха;
 M_B – расход воздуха, кг/с;
 $M_{ПС}$ – расход продуктов сгорания, кг/с;
 L_0 – теоретически необходимый расход сухого воздуха в кг на 1 кг топлива;
 $C_{РПС} = C_{P_2}, C_{P_6}$ – теплоёмкости продуктов сгорания и воздуха, кДж/кг·К;
 $T_C = T_K, T_V = T_P$ – температура воздуха до и после регенератора, К;
 Q_H^P – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг;
 μ_m – молекулярный вес смеси газов;
 E – характеристика элементарного состава топлива;
 N_e – эффективная мощность ГТУ, кВт;
 η_e – эффективный КПД ГТУ;
 $\eta_{КС}$ – КПД камеры сгорания;
 $N_{ОК}$ – мощность Осевого компрессора, кВт;
 $N_{ТВД}$ – мощность ТВД, кВт;
 T_S – температура продуктов сгорания за ТВД, К;
 N_H – мощность нагнетателя, кВт;
 R – газовая постоянная, кДж/кг·К;
 $\pi_T = \varepsilon_T$ – степень расширения продуктов сгорания в ТВД и ТНД;
 $P_Z = P_\Gamma$ – давление продуктов сгорания перед ТВД;
 η_L – лопаточный КПД турбины;
 k – показатель изоэнтропии в процессе расширения;
 g_m – относительный расход топлива, кг
 T_O – температура определения низшей теплоты сгорания Q_H^P , К;
 L_K – удельная работа компрессора, кДж/кг;
 L_T – удельная работа турбины, кДж/кг;
 η_M – механический КПД турбины;
 $N_{e_{y\delta}}$ – удельная мощность ГТУ, кВт;
 C_e – удельный расход топлива, кг/кВт·ч;
 C – коэффициент характеризующий состав газа;
 ΔC_P – поправка к теплоёмкости газа, кДж/кг·К;
 C_{P0} – среднее значение теплоёмкости газа в разреженном состоянии, кДж/кг·К;
 T_1, T_2 – температуры газа на входе и выходе из нагнетателя, К;
 Δh – изменение энтальпии, кДж/кг;
 $\rho_{нагн}$ – плотность газа на входе в нагнетатель, кг/м³;
 $n, n_{НОМ}$ – рабочее и номинальное значение частоты вращения ротора ТНД, об/мин;
 $N_{мех}$ – механические потери мощности, кВт;

$N_{eП}$ – паспортная мощность ГТУ, кВт;
 $T_{Zном}$ – номинальное значение температуры продуктов сгорания перед ТВД, К;
 $T_{aном}$ – номинальное значение температуры наружного воздуха, К;
 $P_{aном}$ – номинальное значение давления наружного воздуха, МПа;
 $k_{ГТУ}$ – коэффициент технического состояния ГТУ;
 C^* – коэффициент приведения для ГТКомпрессора-10-4;
 $\eta_{eном}$ – номинальное значение эффективного КПД ГТУ;
 P_C – давление воздуха за ОК, МПа;
 B – мощностной параметр;
 ε_K – степень сжатия воздуха в компрессоре;
 K – поправочный коэффициент, учитывающий параметры воздуха перед компрессором;
 $P_{НОМ}, T_{НОМ}$ – значения давления и температуры наружного воздуха при нормальных условиях, МПа, К;
 A – коэффициент входного конфузора компрессора;
 ΔP_K – перепад давления в конфузоре перед компрессором, МПа;
 $N_{eНОМ}$ – номинальное значение эффективной мощности, кВт.

Общая схема измерения термогазодинамических параметров

Расчет эффективной мощности и КПД газоперекачивающего агрегата выполнен для газотурбинных двигателей (комплексов) ГТК-10-4 (рис. 3) с нагнетателем 370-18-1 по методикам известных учёных: Зарицкого С.П., Лопатина А.С., Поршакова Б.П., Степанова О.А., Шабарова А.Б.

Расчёт термогазодинамических параметров проводится с целью качественного сравнения существующих методик определения эффективной мощности N_e , КПД η_e и выявлению их применимости на практике в области диагностики газоперекачивающих агрегатов. Расчётная схема приведена на рис. 4.

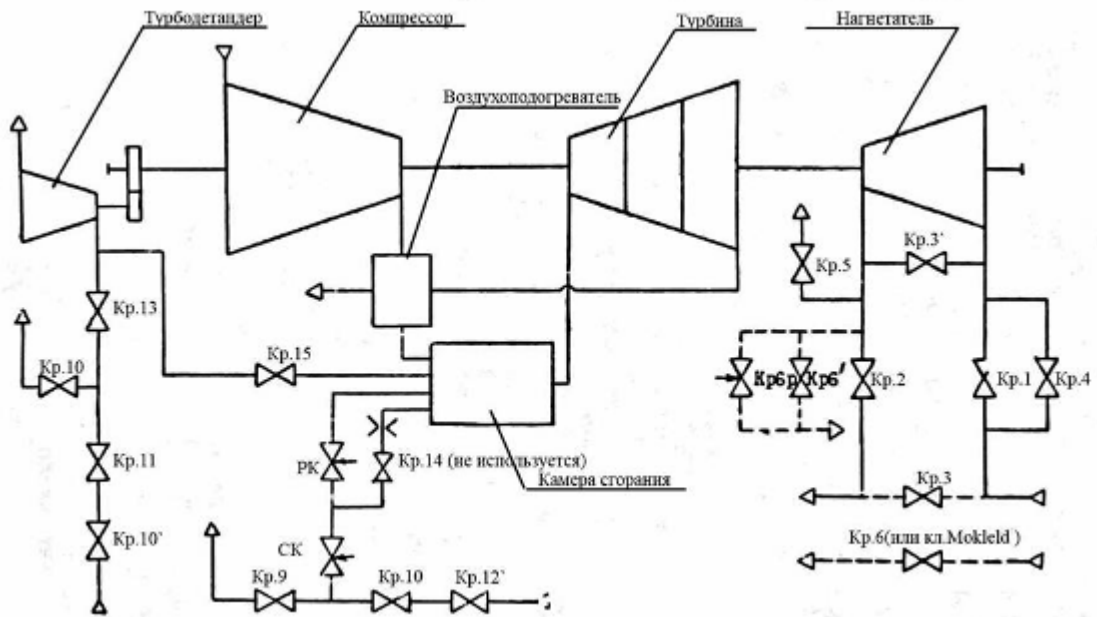


Рис. 3. Общая схема ГТК-10-4

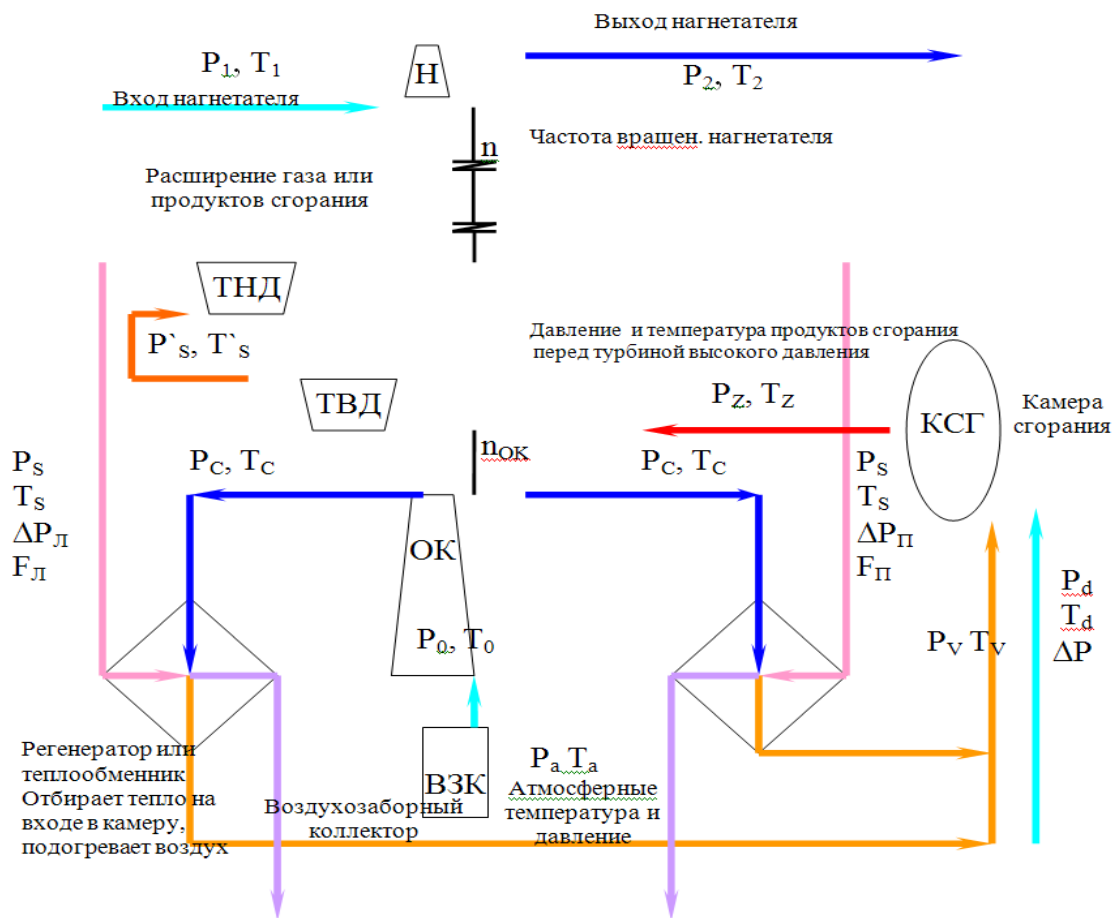


Рис. 4. Схема измерения ТГДП

На расчётной схеме указаны основные конструкционные элементы газоперерабатывающих агрегатов ГПА и параметры, измеряемые на агрегатах с помощью, как штатных приборов, так и специально устанавливаемых измерительных приборов необходимых для получения достаточной первичной информации используемой в расчётных методиках. Более детальное описание схемы приведено ниже.

Из воздухозаборной камеры забирается воздух с параметрами T_a и P_a , которые регистрируются штатными приборами. Перед первой ступенью ОК происходит небольшое изменение параметров всасываемого воздуха до уровня T_0, P_0 . В ОК воздух сжимается и на выходе приобретает параметры T_c, P_c , которые регистрируются штатной аппаратурой. Сжатый воздух поступает в теплообменник (регенератор) и подогревается до температуры T_v и давление составляет P_v . Сжатый и подогретый воздух поступает в камеру сгорания, где смешивается с топливным газом, который подаётся по отдельному топливопроводу. Параметры топливного газа $T_d, P_d, \Delta P$ регистрируются дополнительной аппаратурой. Продукты сгорания после КСГ поступают в ТВД с параметрами T_z и P_z . T_z рассчитывается, P_z регистрируется штатной аппаратурой. Температура продуктов сгорания (T_s) между ТВД и ТНД рассчитывается. Продукты сгорания на выходе ТНД имеют параметры T_s и P_s , измеряемые штатной аппаратурой. Дополнительно установлен расходомер продуктов сгорания, который регистрирует ΔP , как на левом, так и на правом газоходе. По нагнетателю штатной аппаратурой регистрируются параметры газа T_1, P_1 и T_2, P_2 , а также частота вращения ротора нагнетателя $n = n_{ТНД}$ и ротора ОК ($n_{ОК} = n_{ТВД}$). Состав компонентов транспортируемого газа по данным КС приведён в табл.1.

Исходные данные для расчёта ТГДП

Исходные данные по составу и характеристикам компонентов природного газа приведены в табл.1, 3. Общие исходные данные по ТГП ГТК-10-4 (рис. 3) приведены в табл. 2, 4.

Таблица 1

Состав и характеристики компонентов природного газа

для 1-6 вариантов

Характеристики	Компоненты						
	$r_{CН4}$	r_{C2H6}	r_{C3H8}	r_{C4H10}	r_{CO2}	r_{H2S}	r_{N2}
	r_{C1}	r_{C2}	r_{C3}	r_{C4}			
Молярная концентрация %, r	98,0	0,4	0,2	0,0	0,1	-	1,3
Молекулярный вес, μ_i	16,04	30,07	44,09	58,12	44,02	-	28,00
Низшая теплота сгорания $Q_{НРi}$, кДж/кг	49933	47415	46302	47327	-	21750	-

Таблица 2

Общие исходные данные для 1-6 вариантов

№ варианта		1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7	8
Величина	Размерность	Значения					
ρ_{15}	кг/м ³	1,226					
ρ_H	кг/м ³	0,690					
P_a	МПа	0,0987	0,0900	0,0968	0,1000	0,0968	0,0987
T_a	К	294	294	291	274	272	290
P_0	МПа	0,102	0,0985	0,0968	0,0961	0,0968	0,097
T_0	К	288	294	291	295	292	293
P_1	МПа	5,8	5,80	6,28	6,15	6,13	6,0
T_1	К	300	297,1	303,5	289,4	299,8	300
P_2	МПа	6,2	6,49	7,16	6,03	7,26	6,0
T_2	К	315,5	306,9	316,5	302,5	313,2	310,5
P_C	МПа	0,305	0,3563	0,3633	0,3793	0,4033	0,300
T_C	К	480	550	463	485	480	570
T_V	К	653	657	659	650	664	760
P_Z	МПа	0,36	0,3513	0,3603	0,3563	0,4	0,38
T_S	К	743	641	750	850	800	940
$P_{изб}$	МПа	0,0026	0,0046	0,0026	0,003	0,00310	0,003
ΔP_{II}	МПа	$4,26 \cdot 10^{-4}$	$4,16 \cdot 10^{-4}$	$4,163 \cdot 10^{-4}$	$4,362 \cdot 10^{-4}$	$5,412 \cdot 10^{-4}$	$4,30 \cdot 10^{-4}$
$\Delta P_{Л}$	МПа	$4,36 \cdot 10^{-4}$	$4,18 \cdot 10^{-4}$	$4,16 \cdot 10^{-4}$	$4,350 \cdot 10^{-4}$	$5,404 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-4}$
B	кг/с	0,665	0,50	0,555	0,770	0,662	0,85
F_{II}	м ²	1,826					
$F_{Л}$	м ²	1,826					

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8
P_{Sn}	МПа	0,1039	0,1038	0,1039	0,1040	0,1041	0,1050
P_{Sl}	МПа	0,1039	0,1038	0,1039	0,1040	0,1041	0,1050
η_l		0,93					
η_e		0,98					
η_m		0,995					
T_O	К	288					
$\rho_{нагн}$	кг/м ³	40,561	43,100	45,680	39,300	45,136	46,600
b_1		19,8					
b_2		-9067,4					
b_3		53778,5					
b_4		-98100,6					
b_5		57570,2					
$n_{ном}$	об/мин	4800					
n	об/мин	4300	4260	4100	4220	4320	4800
$N_{мех}$	кВт	100					
$N_{еном}$	кВт	10000					
$T_{Zном}$	К	1053					
$Ta_{ном}$	К	288					
$Pa_{ном}$	МПа	0,101325					
$\eta_{еном}$		0,29					
C		0,3					
A		0,292					
ΔP_K	МПа	0,0097 4	0,00920	0,0092 7	0,00930	0,00960	0,00980

Таблица 3

Состав и характеристики компонентов природного газа
для 7-12 вариантов

Характеристики	Компоненты						
	r_{CH4}	r_{C2H6}	r_{C3H8}	r_{C4H10}	r_{CO2}	r_{H2S}	r_{N2}
	r_{C1}	r_{C2}	r_{C3}	r_{C4}			
Молярная концентрация %, r	96,0	2,0	1,0	0,05	0,15	0,1	0,7
Молекулярный вес, μ_i	16,04	30,07	44,09	58,12	44,02	34,02	28,00
Низшая теплота сгорания Q_{HFi} , кДж/кг	49933	47415	46302	47327	-	21750	-

Таблица 4

Общие исходные данные для 7-12 вариантов

№ варианта		7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6	7	8
Величина	Размерность	Значения					
ρ_{15}	кг/м ³	1,226					
ρ_H	кг/м ³	0,690					
P_a	МПа	0,1	0,0985	0,0966	0,0961	0,0962	0,0983
T_a	К	298	294	291	274	272	288
P_0	МПа	0,0987	0,0985	0,0968	0,0961	0,0968	0,0981
T_0	К	298	294	291	274	272	288
P_1	МПа	5,38	5,80	6,28	5,15	6,13	6,08
T_1	К	296,0	297,1	303,5	289,4	299,8	288,0
P_2	МПа	6,18	6,49	7,16	6,03	7,26	7,46
T_2	К	309,0	306,9	316,5	302,5	313,2	306,0
P_C	МПа	0,3603	0,3563	0,3633	0,3793	0,4033	0,4320
T_C	К	448	450	450	400	350	463
T_V	К	651	600	650	648	655	670
P_Z	МПа	0,3593	0,3513	0,3603	0,3563	0,4013	0,4120
T_S	К	815	900	720	890	920	756
$P_{изб}$	МПа	0,0026	0,00250	0,00260	0,00275	0,00310	0,00440
ΔP_{II}	МПа	$4,26 \cdot 10^{-4}$	$4,162 \cdot 10^{-4}$	$4,166 \cdot 10^{-4}$	$4,552 \cdot 10^{-4}$	$5,404 \cdot 10^{-4}$	$6,306 \cdot 10^{-4}$
ΔP_{JI}	МПа	$4,36 \cdot 10^{-4}$	$4,132 \cdot 10^{-4}$	$4,163 \cdot 10^{-4}$	$4,550 \cdot 10^{-4}$	$5,408 \cdot 10^{-4}$	$6,30 \cdot 10^{-4}$
B	кг/с	0,74	0,78	0,555	0,670	0,662	0,702
F_{II}	м ²	1,826					
F_{JI}	м ²	1,826					
P_{Sn}	МПа	0,1039	0,1038	0,1039	0,1040	0,1041	0,1057
P_{Sl}	МПа	0,1039	0,1038	0,1039	0,1040	0,1041	0,1057
η_l		0,93					
η_e		0,98					
η_m		0,995					
T_O	К	288					
$\rho_{нагн}$	кг/м ³	40,561	43,100	45,680	39,300	45,136	46,600
b_1		19,8					
b_2		-9067,4					
b_3		53778,5					
b_4		-98100,6					
b_5		57570,2					
$n_{ном}$	об/мин	4800					

1	2	3	4	5	6	7	8
n	об/мин	4300	4260	4100	4220	4320	4800
$N_{\text{мех}}$	кВт	100					
$N_{\text{еном}}$	кВт	10000					
$T_{\text{ЗНОМ}}$	К	1053					
$Ta_{\text{НОМ}}$	К	288					
$Pa_{\text{НОМ}}$	МПа	0,101325					
$\eta_{\text{еном}}$		0,29					
C^{\wedge}		0,3					
A		0,292					
ΔP_K	МПа	0,00974	0,00920	0,00927	0,00930	0,00960	0,00980

**Расчёт ТГДП, основанный на методике Степанова О.А.,
Чекардовского М.Н., Чекардовского С.М.**

Используя исходные данные табл. 4.1 и 4.2 рассчитываются следующие характеристики газа по уравнениям:

$$\mu_m = \frac{1}{100} \cdot \sum r_i \cdot \mu_i . \quad (1)$$

Весовая горючая концентрация элементов топлива в %:

$$C^{\circ} = \frac{12,01}{\mu_m} \cdot (r_{C_1} + 2r_{C_2} + 3r_{C_3} + 4r_{C_4} + r_{CO_2}) , \quad (2)$$

$$H^{\circ} = \frac{1,008}{\mu_m} (4r_{C_1} + 6r_{C_2} + 8r_{C_3} + 2r_{H_2S}) , \quad (3)$$

$$S^{\circ} = \frac{32,06}{\mu_m} r_{H_2S} , \quad (4)$$

$$N^{\circ} = \frac{14,008}{\mu_m} 2r_{N_2} , \quad (5)$$

$$O^{\circ} = \frac{16}{\mu_m} 2r_{CO_2} , \quad (6)$$

где C° , H° , S° , N° , O° – весовая горючая концентрация соответственно углерода, водорода, серы, азота, кислорода.

$$E = 2,979 \frac{H^{\circ} - 0,126 \cdot O^{\circ}}{C^{\circ} + 0,375 \cdot S^{\circ}} , \quad (7)$$

$$L_0 = 0,1151 \cdot (1 + E) \cdot (C^{\circ} + 0,375 S^{\circ}) , \quad (8)$$

$$Q_H^P = \frac{\sum r_i \cdot Q_i}{100}, \quad (9)$$

$$R = \frac{8,314}{\mu_m}. \quad (10)$$

Плотность продуктов сгорания за ТВД:

$$P_s = P_a + P_{изб}, \quad (11)$$

левый газоход

$$\rho_{Л} = \rho_{15} \cdot \frac{P_s \cdot 288}{0,0981 \cdot T_s}, \quad (12)$$

правый газоход

$$\rho_{П} = \rho_{15} \cdot \frac{P_s \cdot 288}{0,0981 \cdot T_s}. \quad (13)$$

Расходы продуктов сгорания:

$$M_{ПсЛ} = F_{Л} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P_{Л} \cdot 10^6 \cdot \rho_{Л}}, \quad (14)$$

$$M_{ПсП} = F_{П} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P_{П} \cdot 10^6 \cdot \rho_{П}}, \quad (15)$$

$$M_{Пс} = M_{ПсП} + M_{ПсЛ}, \quad (16)$$

$$M_B = M_{Пс} - B, \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{M_B}{B \cdot L_0}, \quad (18)$$

$$C_{P_B} = 0,9379 + 0,000198 \cdot \frac{T_s + T_c}{2}. \quad (19)$$

Температура продуктов сгорания перед ТВД рассчитывается по следующей формуле:

$$T_Z = \frac{0,98 \cdot Q_H^P + C_{P_B} \cdot (\alpha \cdot L_0 \cdot T_V + T_0)}{C_{P_B} \cdot (\alpha \cdot L_0 + 1)}. \quad (20)$$

Мощность осевого компрессора:

$$N_{ОК} = M_B \cdot C_{P_B} \cdot (T_c - T_0). \quad (21)$$

Мощность турбины высокого давления при условии, что ТВД и ОК на одном валу:

$$N_{ТВД} = 1,015 \cdot N_{ОК}. \quad (22)$$

Температура продуктов сгорания за ТВД:

$$C_{P_{PC}} = 0,9796 + 0,000283 \cdot \frac{T_s + T_c}{2}, \quad (23)$$

$$T_s = T_z - \frac{N_{ТВД}}{M_{PC} \cdot C_{P_{PC}}}. \quad (24)$$

Эффективная мощность ГПА:

$$N_e = M_{PC} \cdot C_{P_{PC}} \cdot (T_s - T_s). \quad (25)$$

Эффективный КПД ГПА:

$$\eta_e = \frac{N_e}{B \cdot Q_p^H}. \quad (26)$$

Учебное издание

ЧУХАРЕВА Наталья Вячеславовна

РАСЧЕТ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Методические указания к выполнению практических работ
по курсу «Газотурбинные установки» для студентов IV курса
заочного отделения, обучающихся по направлению
130500 «Нефтегазовое дело»,
специальности 130501 «Проектирование, сооружение и эксплуатация
газонефтепроводов и газонефтехранилищ»

Научный редактор
кандидат технических наук,
доцент


А.В. Рудаченко

Подписано к печати 00.00.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печат в Херо. Усл. печ. л. 000. Уч.-изд. л. 000.
Заказ XXX. Тираж XXX экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел. / факс: 8(3822) 56-35-35. www.tpu.ru