

## Методы и средства измерения параметров газового потока

### 1.1. Цель и содержание работы

1. Изучение основных методов и средств измерений параметров газового потока.
2. Приобретение практических навыков использования измерительных приборов и средств измерений для определения давления, температуры, скорости газового потока и его расхода.

### 1.2. Схема системы измерений параметров газового потока

Схема системы измерения параметров ТРДДсм представлена на рис. 1.1.

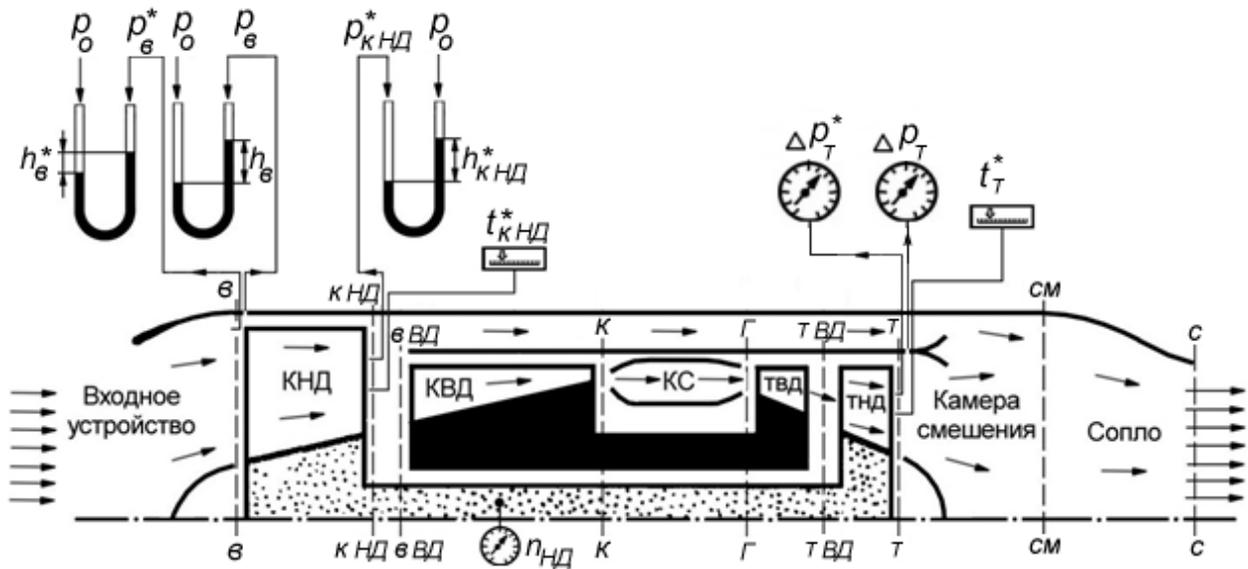


Рис. 1.1. Схема системы измерения параметров ТРДДсм

### 1.3. Порядок обработки результатов эксперимента

Результаты измерений параметров потока воздуха и газа в различных сечениях проточной части двухконтурного двигателя со смешением потоков (ТРДДсм), в которых установлены датчики давлений и температуры, представлены в табл. 1.1 и табл. 1.2.

Каждый студент по указанию преподавателя выполняет обработку результатов измерений газового потока в тракте двигателя по одному из вариантов, представленных в таблицах. Используя эти измерения, следует определить параметры, перечисленные в табл. 1.3.

#### Примечания:

1. При вычислении  $p_v$  и  $p_v^*$  необходимо учитывать знаки  $h_v$  и  $h_v^*$ , указанные в табл. 1.1 и табл. 1.2.
2.  $B_0=760$  мм рт.ст. – барометрическое давление наружного воздуха.

Таблица 1.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
$n_{\text{нд}}$	0,75	0,775	0,8	0,825	0,85	0,875	0,9
$h_{\text{в}}$ , мм вод. ст.	-1271,9	-1351,5	-1435,4	-1528,5	-1621,9	-1725,6	-1836,1
$h_{\text{в}}^*$ , мм вод. ст.	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2
$t_{\text{кнд}}^*$ , °C	46,4	49,6	53	56,5	60	63,7	67,2
$h_{\text{кнд}}^*$ , мм рт. ст.	282,2	315,5	351,1	388,2	426	464,7	504,8
$\Delta p_{\text{т}}^*$ , дел. шкалы	44,6	55,8	65,2	75,6	87,8	98	109,7
$\Delta p_{\text{т}}$ , дел. шкалы	15,7	24,5	30,7	37,7	46,3	52,5	60,4
$t_{\text{т}}^*$ , °C	460,2	472,4	485,7	501,6	518,7	534,5	550,3

Таблица 1.2

Вариант	8	9	10	11	12	13
$n_{\text{нд}}$	0,925	0,95	0,975	1	1,025	1,05
$h_{\text{в}}$ , мм вод. ст.	-1953,4	-2071,7	-2198,2	-2326,8	-2447,4	-2568,8
$h_{\text{в}}^*$ , мм вод. ст.	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2
$t_{\text{кнд}}^*$ , °C	70,9	74,6	78,4	81,9	85,3	88,8
$h_{\text{кнд}}^*$ , мм рт. ст.	544,9	585	624,4	662,2	697,8	730,3
$\Delta p_{\text{т}}^*$ , дел. шкалы	121,4	132,4	143,7	154,3	164,7	174,2
$\Delta p_{\text{т}}$ , дел. шкалы	68	74,6	81,9	88,3	94,5	99,3
$t_{\text{т}}^*$ , °C	566,3	582,6	597,9	612,9	629,3	645,3

Таблица 1.3

1	Формула для расчета параметра	Численное значение параметра	Размерность параметра
2	$p_{\text{в}}$		
3	$p_{\text{в}}^*$		
4	$\Pi \lambda_{\text{в}}$		
5	$\lambda_{\text{в}}$		
6	$\tau \lambda_{\text{в}}$		
7	$\varepsilon \lambda_{\text{в}}$		
8	$q \lambda_{\text{в}}$		
9	$T_{\text{в}}^*$		
10	$c_{\text{ав}}$		
11	$G_{\text{в}}$		
12	$p_{\text{кнд}}^*$		

	Формула для расчета параметра	Численное значение параметра	Размерность параметра
13	$T_{кНД}^*$		
14	$q \lambda_{кНД}$		
15	$\lambda_{кНД}$		
16	$\Pi \lambda_{кНД}$		
17	$c_{а кНД}$		
18	$p_T$		
19	$p_T^*$		
20	$\Pi \lambda_T$		
21	$\lambda_T$		
22	$T_T^*$		
23	$c_{а Т}$		

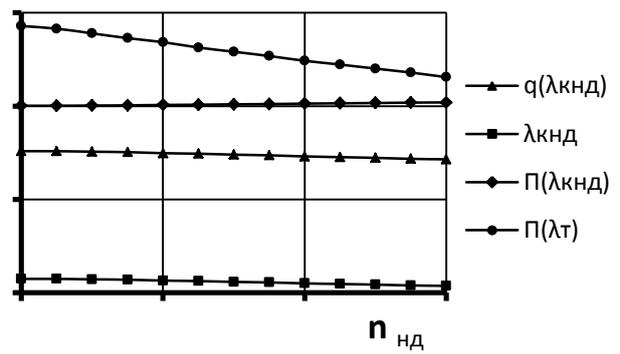
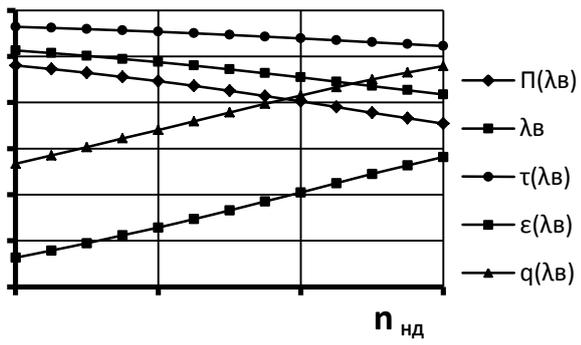
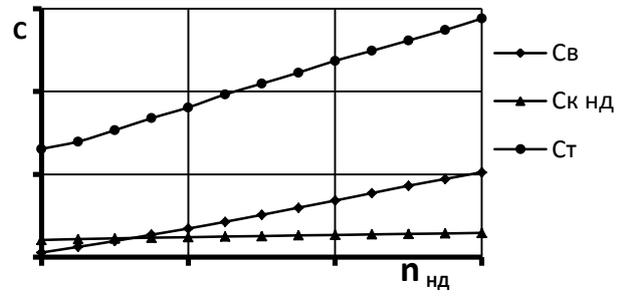
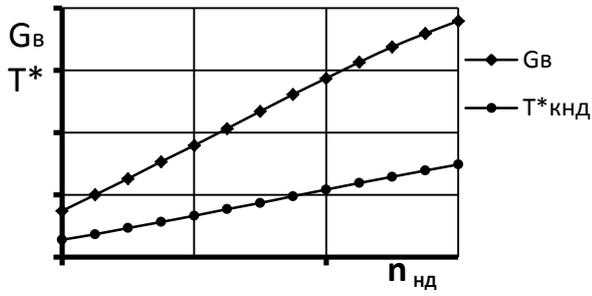
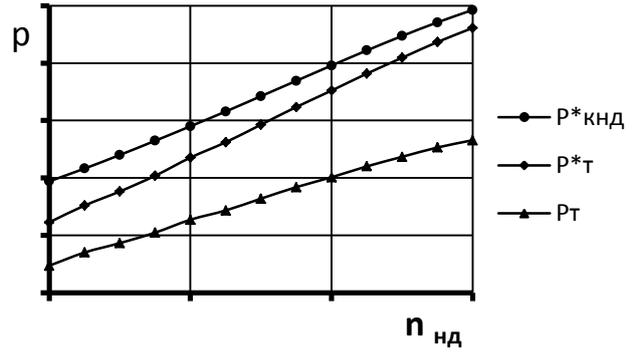
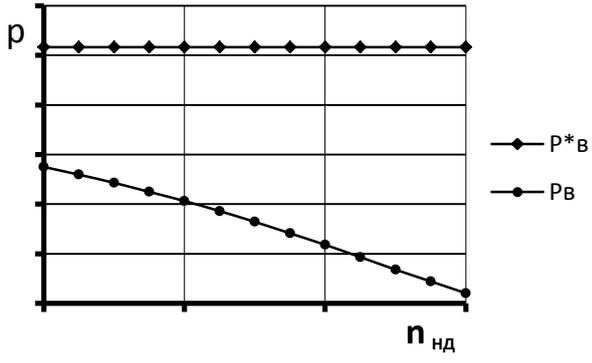
#### 1.4. Отчетность по лабораторной работе

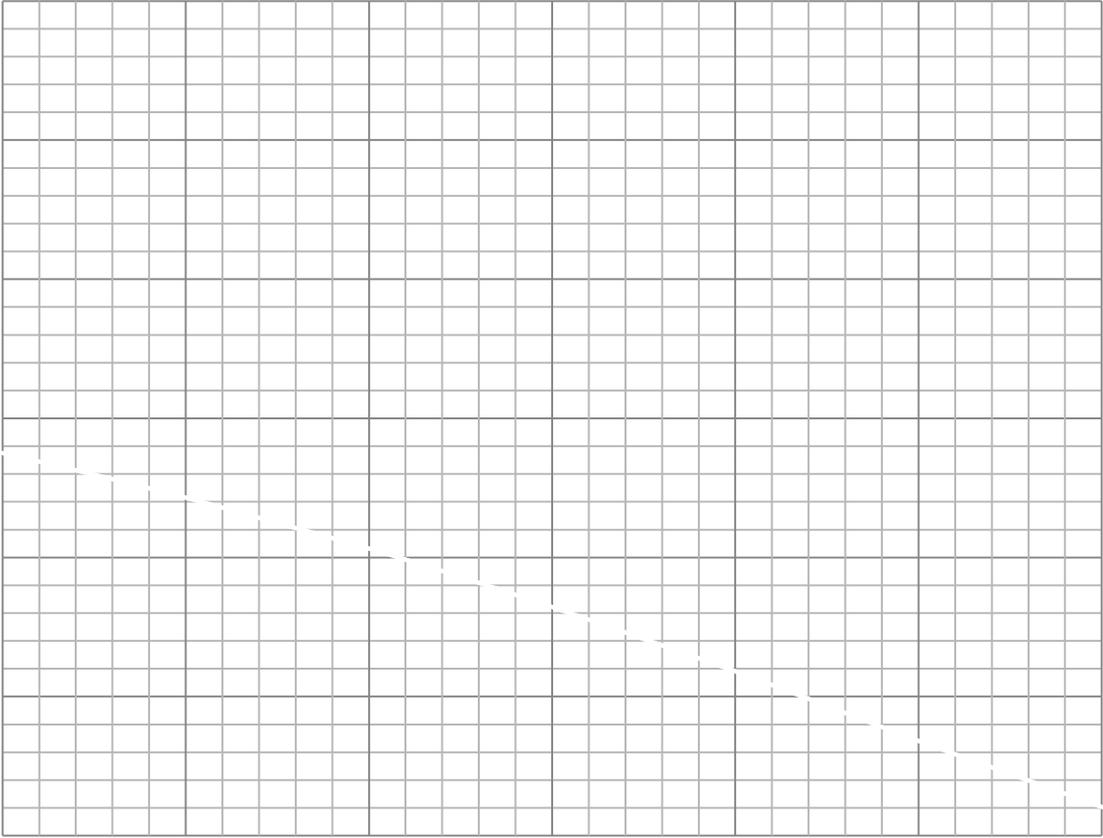
*Отчет по лабораторной работе должен содержать:*

1. Результаты обработки данных эксперимента по определению параметров газового потока в проточной части двигателя (табл. 1.3) в соответствии с заданным преподавателем вариантом.

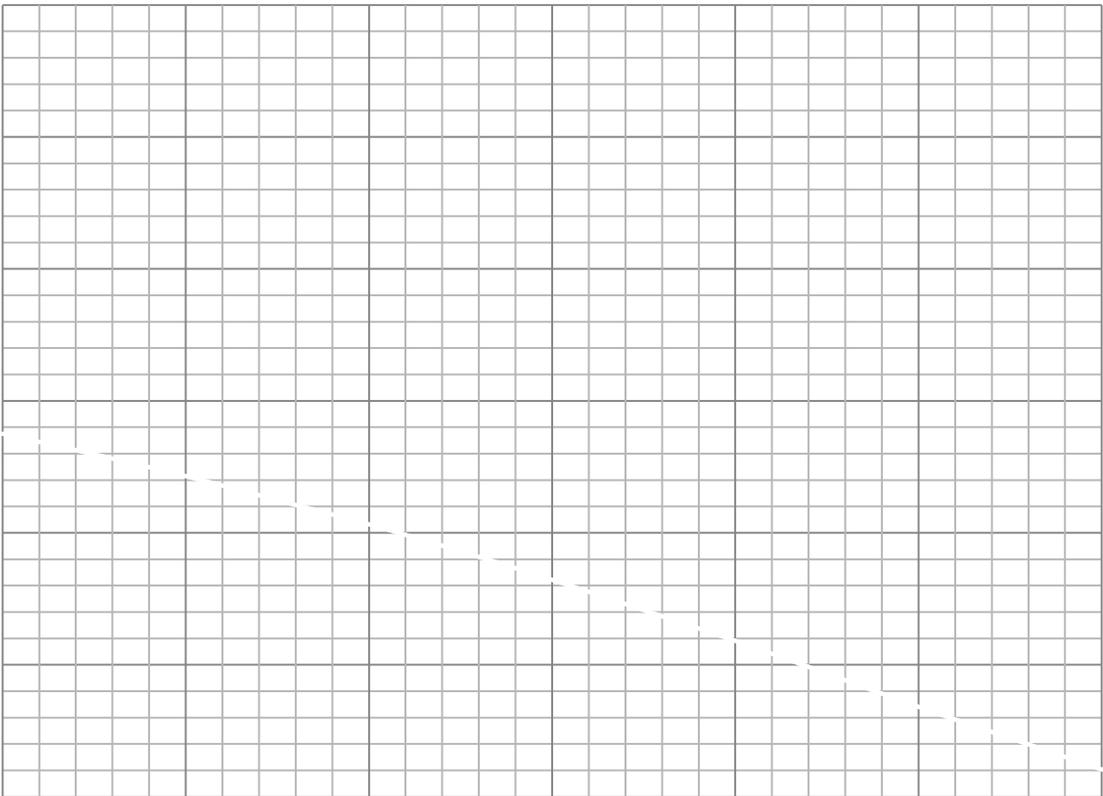
2. Несколько графиков (по указанию преподавателя), построенных с использованием данных, полученных расчетом в табл. 1.3, по заданному преподавателем варианту и вариантам других студентов, например:  $p_B = f(n_{нд})$ ,  $p_{кНД}^* = f(n_{нд})$ ,  $p_T = f(n_{нд})$ ,  $p_T^* = f(n_{нд})$ ,  $p_{кНД}^* = f(n_{нд})$ ,  $c_B = f(n_{нд})$ ,  $c_{кНД} = f(n_{нд})$ ,  $c_T = f(n_{нд})$ ,  $G_B = f(n_{нд})$ ,  $T_{кНД}^* = f(n_{нд})$ ,  $T_T^* = f(n_{нд})$ .

**Примечание:** вид некоторых графиков представлен ниже.

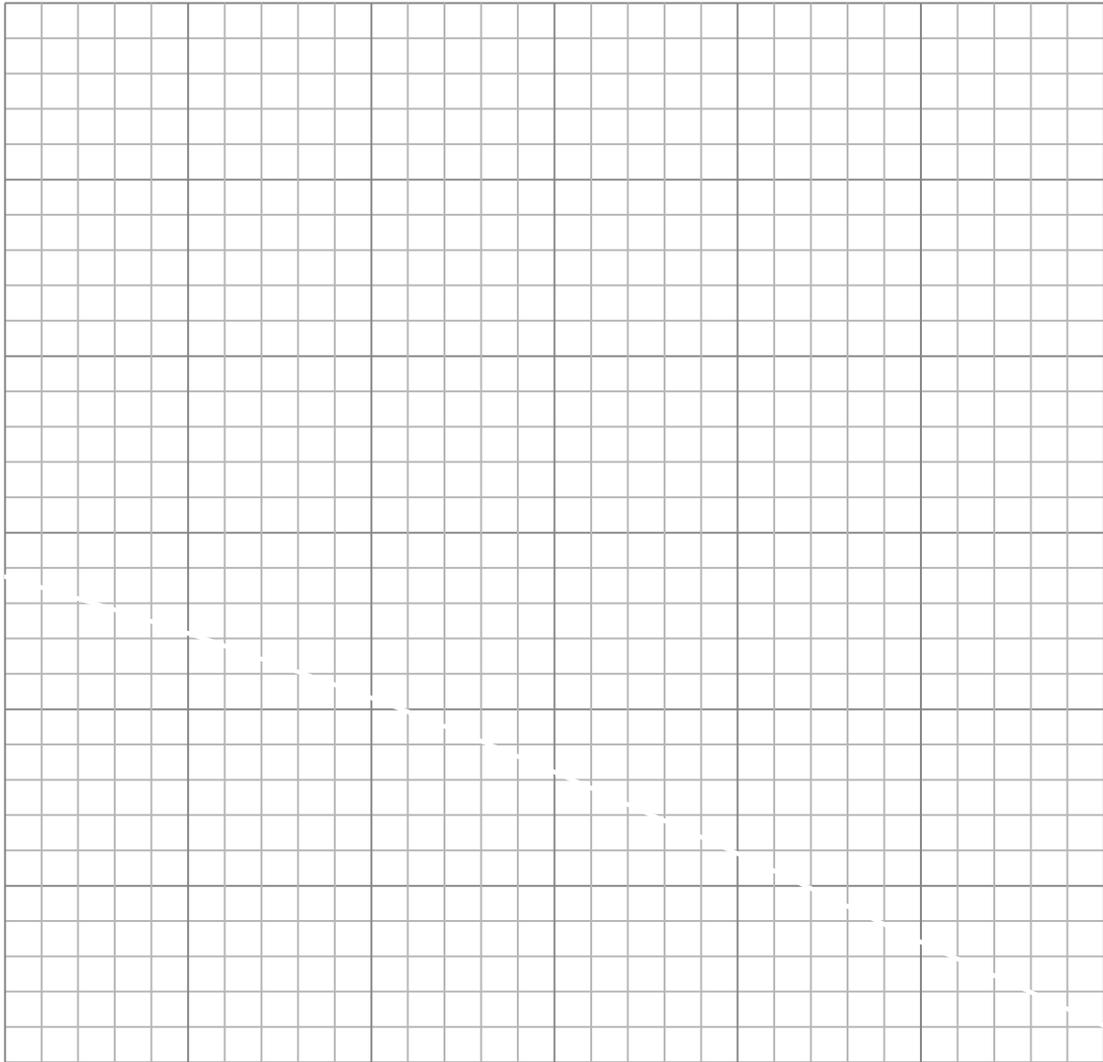




Место для построения графика



Место для построения графика



Место для построения графика

### 1.5. Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы

1. Перечислите физические явления, используемые при измерениях температуры.
2. С чем связана необходимость тарировки показаний термопар?
3. Какие приборы называются манометрами, вакуумметрами и барометрами? Какие параметры измеряются ими?
4. Чем различаются приемники полного и статического давлений?
5. Каким образом можно измерить скорость движения газа?
6. Как можно определить направление потока газа?
7. Что нужно измерить для определения расхода воздуха в мерном коллекторе?
8. В каких случаях для измерения расхода газа используются суживающие поток устройства?
9. Как определяется расход газа через трубку Вентури?

« » \_\_\_\_\_ 201 г.

Студент \_\_\_\_\_

Подпись

ФИО

## Лабораторная работа № 2

## Экспериментальное определение параметров многоступенчатого осевого компрессора при его работе в системе авиационного ГТД

### 2.1. Цель и содержание работы

1. Изучение особенностей характеристик осевых компрессоров.
2. Ознакомление с устройством экспериментального стенда и методикой определения параметров многоступенчатого осевого компрессора при его работе в системе ТРДДсм.
3. Освоение методики обработки результатов экспериментального определения параметров потока воздуха в проточной части компрессора ТРДДсм с целью определения параметров его каскадов.
4. Построение рабочих линий на характеристиках каскадов компрессора ТРДДсм.

### 2.2. Описание объекта испытаний

В данной лабораторной работе объектами исследования являются каскады компрессора двухконтурного турбореактивного двигателя со смешением потоков (рис. 2.1).

### 2.3. Система измерений

Для определения параметров, характеризующих режим работы и данные каскадов компрессора, на двигателе предусмотрено измерение параметров воздуха, указанных на рис. 2.1.

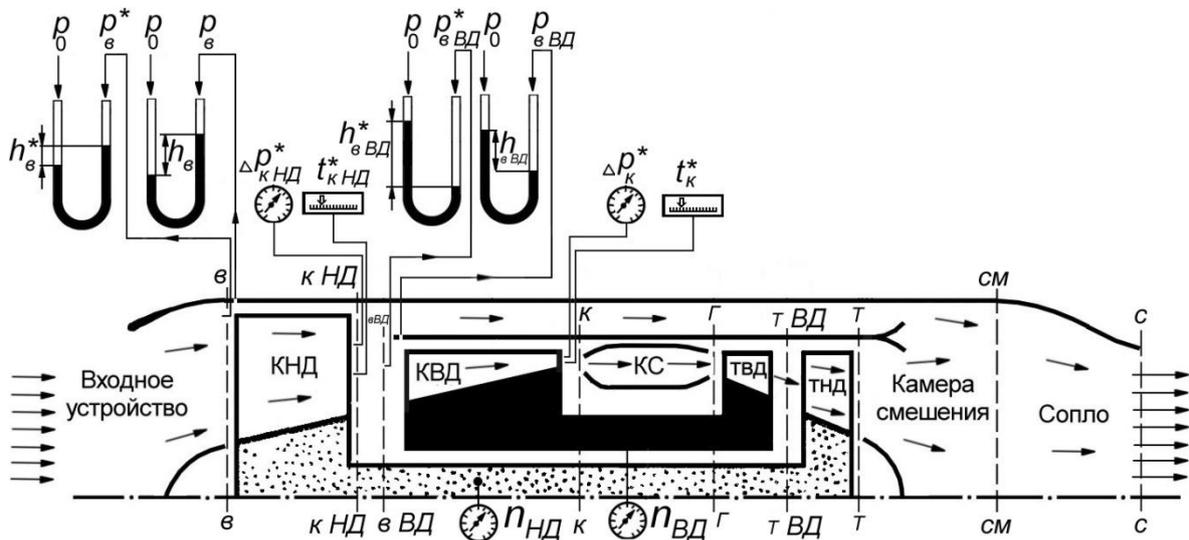


Рис. 2.1. Схема системы измерений параметров воздуха в компрессоре двухконтурного двигателя

Результаты измерений параметров представлены в табл. 2.1 и табл. 2.2.

Таблица 2.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
$n_{\text{нд пр}}$	0,75	0,775	0,8	0,825	0,85	0,875	0,9
$n_{\text{вд пр}}$	0,917	0,924	0,931	0,939	0,948	0,956	0,965
$h_{\text{в}}, \text{мм } H_2O$	-1271,9	-1351,5	-1435,4	-1528,5	-1621,9	-1725,6	-1836,1
$h_{\text{в}}^*, \text{мм } H_2O$	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2
$t_{\text{кнд}}^*, \text{ }^\circ\text{C}$	46,4	49,6	53	56,5	60	63,7	67,2
$t_{\text{к}}^*, \text{ }^\circ\text{C}$	437,5	451,5	466,4	482,4	499,4	515,1	530,5
$\Delta p_{\text{кнд}}^*$ , дел.шкалы	71,9	80,4	89,5	99	108,6	118,4	128,7
$\Delta p_{\text{к}}^*$ , дел.шкалы	174,8	187,4	200,3	214,8	230,9	245,6	261,5
$h_{\text{ввд}}^*, \text{ммHg}$	282,2	315,5	351,1	388,2	426	464,7	504,8
$h_{\text{ввд}}, \text{ммHg}$	193,5	218,7	246	273,5	300,2	328,8	357,8

Таблица 2.2

Вариант	8	9	10	11	12	13
$n_{\text{нд пр}}$	0,925	0,95	0,975	1	1,025	1,05
$n_{\text{вд пр}}$	0,974	0,983	0,992	1	1,008	1,016
$h_{\text{в}}, \text{мм } H_2O$	-1953,4	-2071,7	-2198,2	-2326,8	-2447,4	-2568,8
$h_{\text{в}}^*, \text{мм } H_2O$	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2
$t_{\text{кнд}}^*, \text{ }^\circ\text{C}$	70,9	74,6	78,4	81,9	85,3	88,8
$t_{\text{к}}^*, \text{ }^\circ\text{C}$	546,7	563,1	579,6	594,7	609,8	625
$\Delta p_{\text{кнд}}^*$ , дел.шкалы	138,9	149,1	159,2	168,8	177,9	186,2
$\Delta p_{\text{к}}^*$ , дел.шкалы	277,9	293,5	309,3	324,3	339,3	353,8
$h_{\text{ввд}}^*, \text{ммHg}$	544,9	585	624,4	662,2	697,8	730,3
$h_{\text{ввд}}, \text{ммHg}$	386,2	415,6	444	471,4	496,3	518,2

#### 2.4. Порядок обработки результатов эксперимента

Каждый студент по указанию преподавателя выполняет обработку результатов измерения параметров газового потока в тракте двигателя по одному из вариантов, представленных в табл. 2.1 или в табл. 2.2. Используя эти измерения, следует определить параметры КНД и КВД. Результаты обработки экспериментальных данных необходимо оформить в виде табл. 2.3.

##### Примечания:

1. При вычислении  $p_{\text{в}}$  и  $p_{\text{в}}^*$  следует учитывать знаки  $h_{\text{в}}$  и  $h_{\text{в}}^*$ , указанные в табл. 2.1 и табл. 2.2.

2.  $B_0=760$  мм рт.ст. – барометрическое давление наружного воздуха.

Таблица 2.3

1	Формула для расчета параметра	Численное значение параметра	Размерность параметра
2	$p_B$		
3	$p_B^*$		
4	$p_{кНД}^*$		
5	$p_K^*$		
6	$T_B^*$		
7	$T_{кНД}^*$		
8	$T_K^*$		
9	$\pi_{кНД}^*$		
10	$\pi_{кВД}^*$		
11	$\pi_{к\Sigma}^*$		
12	$\eta_{кНД}^*$		
13	$\eta_{кВД}^*$		
14	$\eta_K^*$		
15	$\lambda_B$		
16	$q \lambda_B$		
17	$G_B$		
18	$p_{ВД}^*$		
19	$p_{ВД}$		
20	$\lambda_{ВД}$		
21	$q \lambda_B \text{ ВД}$		
22	$G_{B1}$		

## 2.5. Отчетность по лабораторной работе

*Отчет по лабораторной работе должен содержать:*

1. Результаты обработки результатов эксперимента (табл. 2.3) по определению параметров газового потока в проточной части двигателя и параметров компрессоров в соответствии с заданным преподавателем вариантом.
2. Графики характеристик КНД (рис. 2.2) и КВД (рис. 2.3) с нанесенными на них рабочими точками, полученными по результатам расчетов по заданному преподавателем варианту и вариантам других студентов.
3. Графики зависимостей  $\eta^*_{\text{КНД}}=f(n_{\text{НД пр}})$ ,  $\eta^*_{\text{КВД}}=f(n_{\text{ВД пр}})$ ,  $\eta^*_\kappa=f(n_{\text{НД пр}})$ , построенные по результатам расчетов по заданному варианту и по результатам вариантов других студентов.

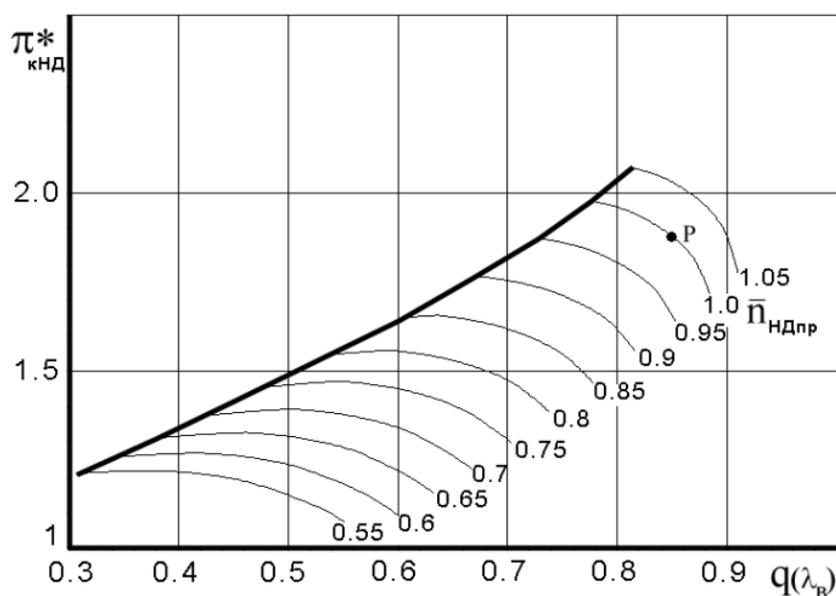


Рис. 2.2. Характеристика КНД

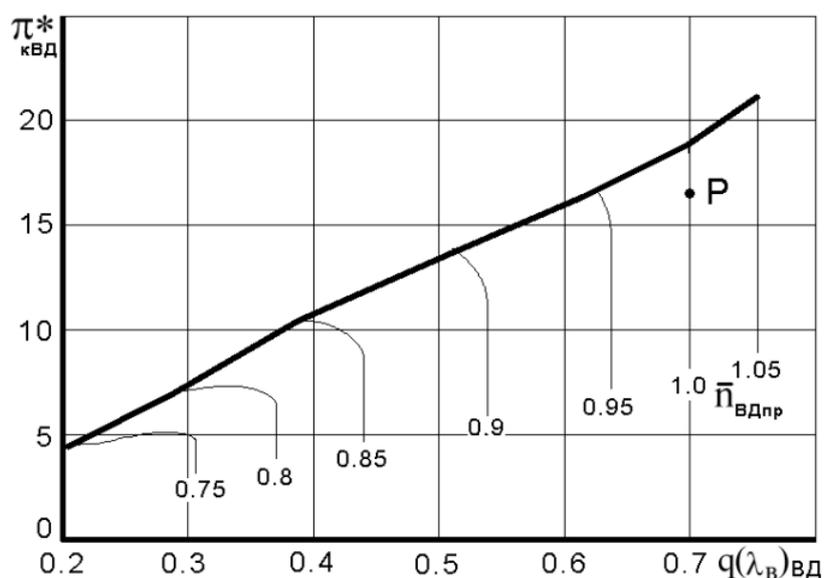
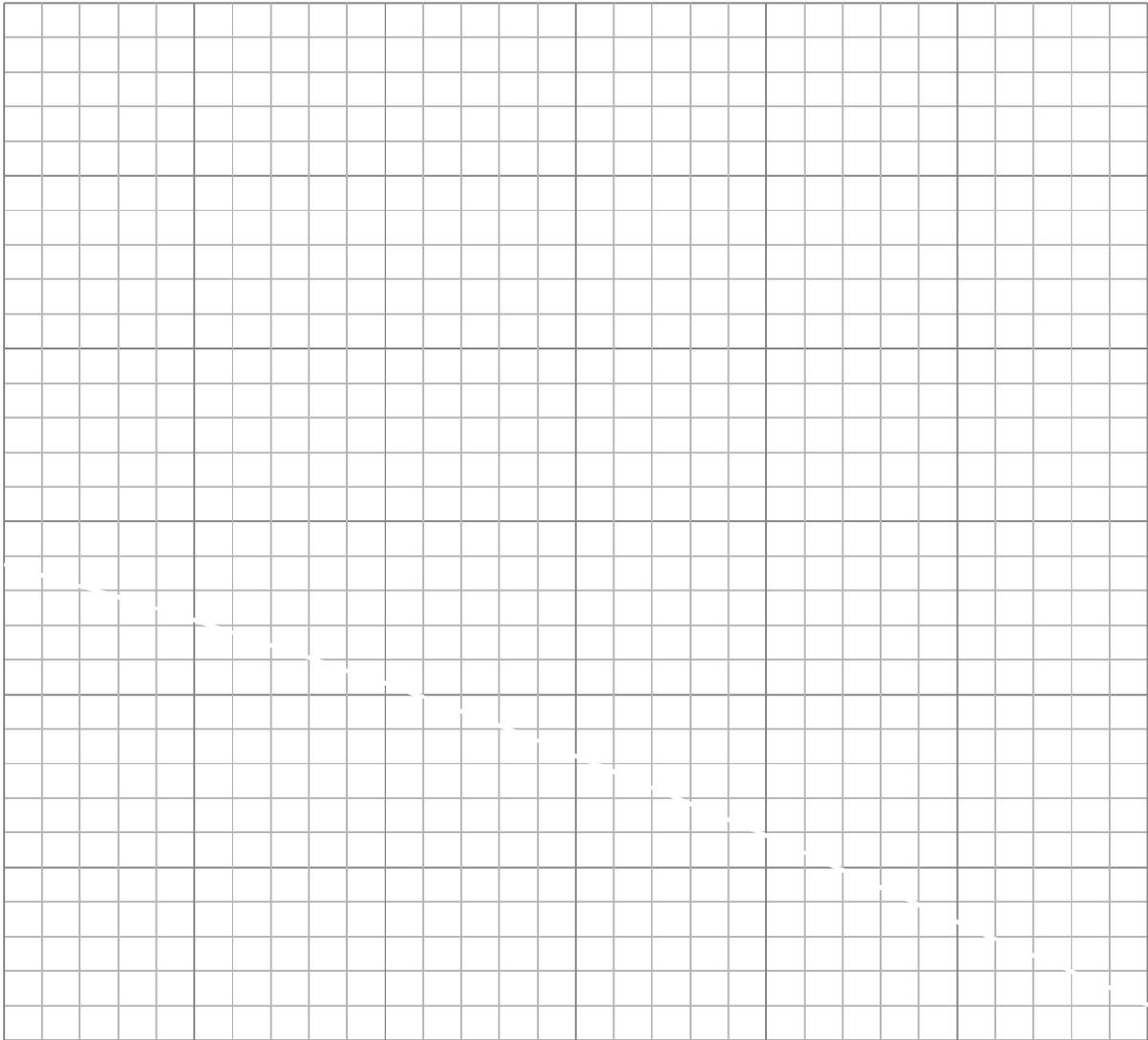


Рис. 2.3. Характеристика КВД



## 2.6. Контрольные вопросы

1. В каких координатах изображается характеристика компрессора? Какие преимущества обеспечивает способ построения характеристики в параметрах подобия?
2. Какой режим работы компрессора называется расчетным?
3. Что называется *рабочей линией* (линией рабочих режимов) на характеристике компрессора?
4. Что называется *линией оптимальных режимов* компрессора?
5. Что называется запасом газодинамической устойчивости компрессора?
6. Изобразите напорную кривую многоступенчатого осевого компрессора и укажите на ней характерные режимы его работы.
7. Расскажите, как влияет изменение частоты вращения на положение напорной кривой на характеристике компрессора.
8. В каких сечениях и какие параметры надо измерить для определения расхода воздуха, степени повышения давления и КПД каскадов компрессора?

« » \_\_\_\_\_ 201 г.      Студент \_\_\_\_\_

Подпись

ФИО

## Лабораторная работа № 3

## Экспериментальное исследование совместной работы крайних ступеней осевого компрессора ТРДДСм

### 3.1. Цель и содержание работы

1. Ознакомление с устройством экспериментального стенда и системы измерения параметров воздуха в проточной части компрессора высокого давления (КВД) при его работе в системе ТРДДСм.
2. Экспериментальное исследование совместной работы ступеней осевого компрессора.
2. Изучение особенностей характеристик осевого компрессора.
3. Построение и анализ зависимостей коэффициентов расхода крайних ступеней КВД ТРДДСм от его приведенных оборотов.

### 3.2. Объект испытаний и система измерений

Объектом испытаний в данной лабораторной работе является компрессор высокого давления ТРДДСм.

Схема системы измерения параметров воздуха, характеризующих режим работы компрессора высокого давления, представлена на рис. 3.1.

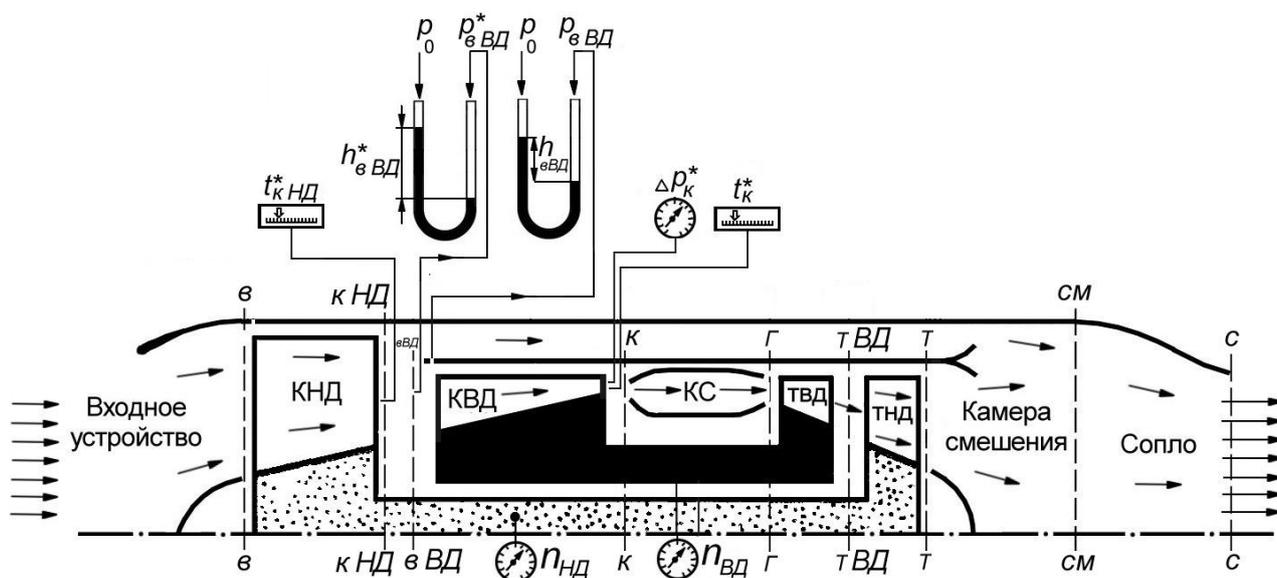


Рис. 3.1. Система измерения параметров воздуха в компрессоре высокого давления

Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 3.1 и табл. 3.2.

Таблица 3.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
$n_{\text{нд пр}}$	0,75	0,775	0,8	0,825	0,85	0,875	0,9
$n_{\text{вд пр}}$	0,917	0,924	0,931	0,939	0,948	0,956	0,965
$t_{\text{кнд}}^*$ , °C	46,4	49,6	53	56,5	60	63,7	67,2
$t_{\text{к}}^*$ , °C	437,5	451,5	466,4	482,4	499,4	515,1	530,5
$\Delta p_{\text{к}}^*$ , дел. шкалы	174,8	187,4	200,3	214,8	230,9	245,6	261,5
$h_{\text{ввд}}^*$ , мм рт. ст.	282,2	315,5	351,1	388,2	426	464,7	504,8
$h_{\text{ввд}}$ , мм рт. ст.	193,5	218,7	246	273,5	300,2	328,8	357,8

Таблица 3.2

Вариант	8	9	10	11	12	13
$n_{\text{нд пр}}$	0,925	0,95	0,975	1	1,025	1,05
$n_{\text{вд пр}}$	0,974	0,983	0,992	1	1,008	1,016
$t_{\text{кнд}}^*$ , °C	70,9	74,6	78,4	81,9	85,3	88,8
$t_{\text{к}}^*$ , °C	546,7	563,1	579,6	594,7	609,8	625
$\Delta p_{\text{к}}^*$ , дел. шкалы	277,9	293,5	309,3	324,3	339,3	353,8
$h_{\text{ввд}}^*$ , мм рт. ст.	544,9	585	624,4	662,2	697,8	730,3
$h_{\text{ввд}}$ , мм рт. ст.	386,2	415,6	444	471,4	496,3	518,2

### 3.3. Порядок обработки результатов эксперимента

Каждый студент по указанию преподавателя выполняет обработку результатов измерений газового потока в тракте двигателя по одному из вариантов, представленных в табл. 3.1 или в табл. 3.2.

Используя результаты этих измерений, следует определить параметры компрессора и оформить результаты расчетов в виде табл. 3.3.

### 3.4. Отчетность по лабораторной работе

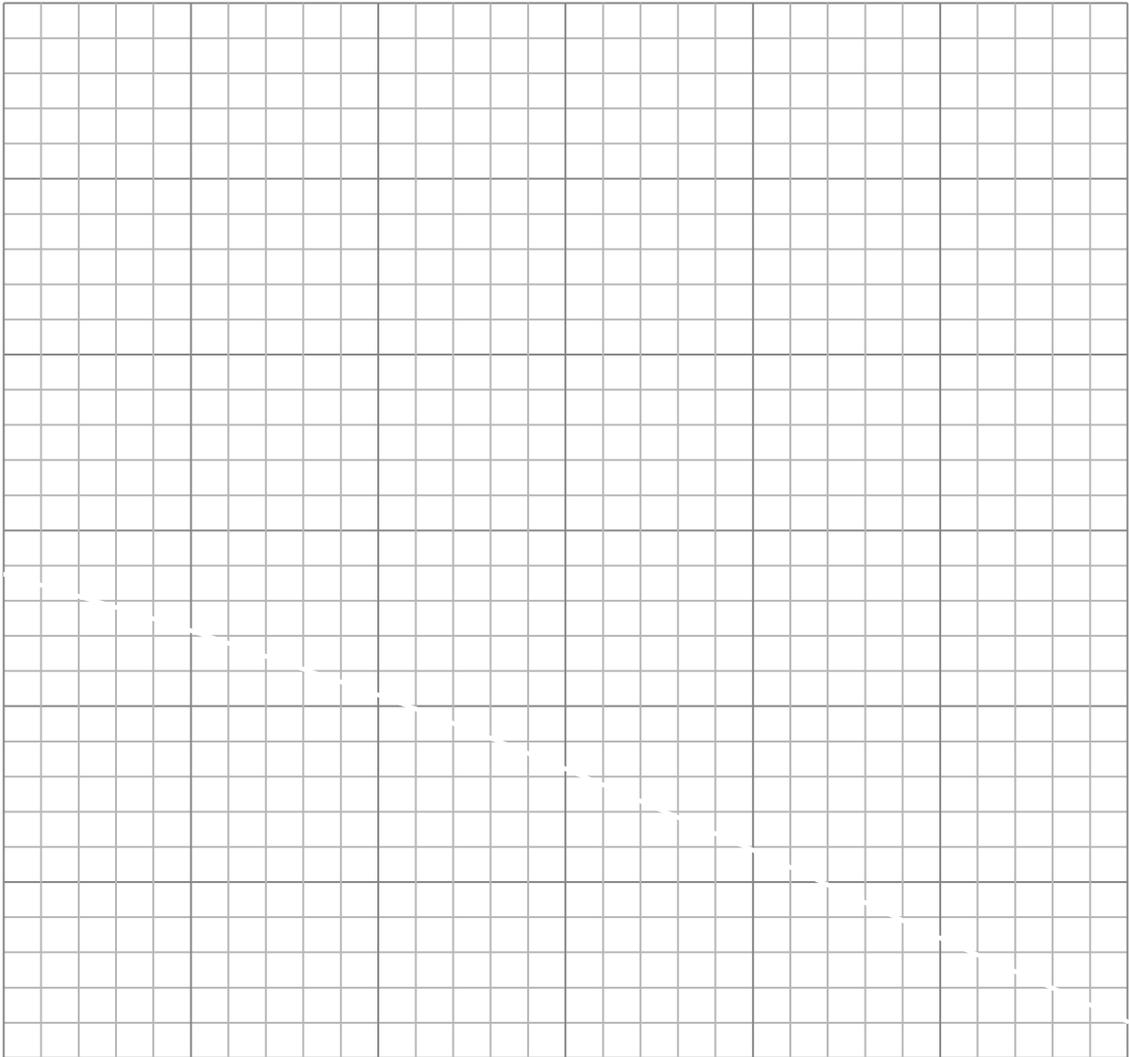
*Отчет по лабораторной работе должен содержать:*

1. Протокол в виде табл. 3.3, содержащий порядок обработки результатов эксперимента и численные результаты расчетов.
2. Графики зависимостей коэффициентов расхода первой и последней ступеней компрессора высокого давления от его приведенной частоты вращения, построенные по результатам расчетов по заданному преподавателем варианту и по результатам вариантов других студентов.

**Примечание:**  $B_0=760$  мм рт. ст. – барометрическое давление наружного воздуха.

Таблица 3.3

1	Формула для расчета параметра	Численное значение параметра	Размерность параметра
2	$p_{вВД}^*$		
3	$p_{вВД}$		
4	$\Pi \lambda_{вВД}$		
5	$\lambda_{вВД}$		
6	$q \lambda_{вВД}$		
7	$T_{кНД}^*$		
8	$G_{вI}$		
9	$c_{а вВД}$		
10	$n_{ВД}$		
11	$u_{к вВД}$		
12	$c_{а вВД}$		
13	$T_{к}^*$		
14	$p_{к}^*$		
15	$q \lambda_{к}$		
16	$\lambda_{к}$		
17	$c_{а к}$		
18	$u_{к}$		
19	$c_{а к}$		



Место для построения графика

### 3.5. Контрольные вопросы

1. Что называется коэффициентом расхода ступени компрессора?
2. Как изменяются коэффициенты расхода первой и последней ступеней компрессора при изменении его приведенной частоты вращения?
3. Что характеризует коэффициент расхода ступени? Как он связан с углом атаки рабочего колеса ступени?
4. Расскажите об устройстве стенда для испытания компрессоров.
5. Нарисуйте и объясните характеристику ступени компрессора.
6. Какие параметры воздуха замерялись на двигателе для определения коэффициентов расхода в ступенях КВД? Какие приборы при этом использовались?
7. Объясните, как определялся расход воздуха через внутренний контур двигателя.

« » \_\_\_\_\_ 201 г.      Студент \_\_\_\_\_

Подпись

ФИО

## Определение основных параметров каскадов турбины по результатам стендовых испытаний ТРДЦсм

### 4.1. Цель и содержание работы

1. Изучение особенностей характеристик ступени турбины.
2. Изучение устройства стенда для испытаний двигателей и системы измерений параметров газового потока в турбине.
3. Определение основных параметров каскадов турбины по результатам стендовых испытаний ТРДЦсм.

### 4.2. Объект испытаний и система измерений

В данной лабораторной работе объектом исследования являются каскады турбин ТРДЦсм. Турбина этого двигателя двухвальная, её роторы вращаются с разными частотами вращения. ТВД приводит во вращение компрессор высокого давления, а ТНД вращает компрессор низкого давления.

Стенд, на котором установлен двигатель, оснащен приборами для измерения параметров газа перед и за каждым каскадом турбины. Схема системы измерений представлена на рис. 4.1, а результаты измерений параметров газового потока – в табл. 4.1 и табл. 4.2.

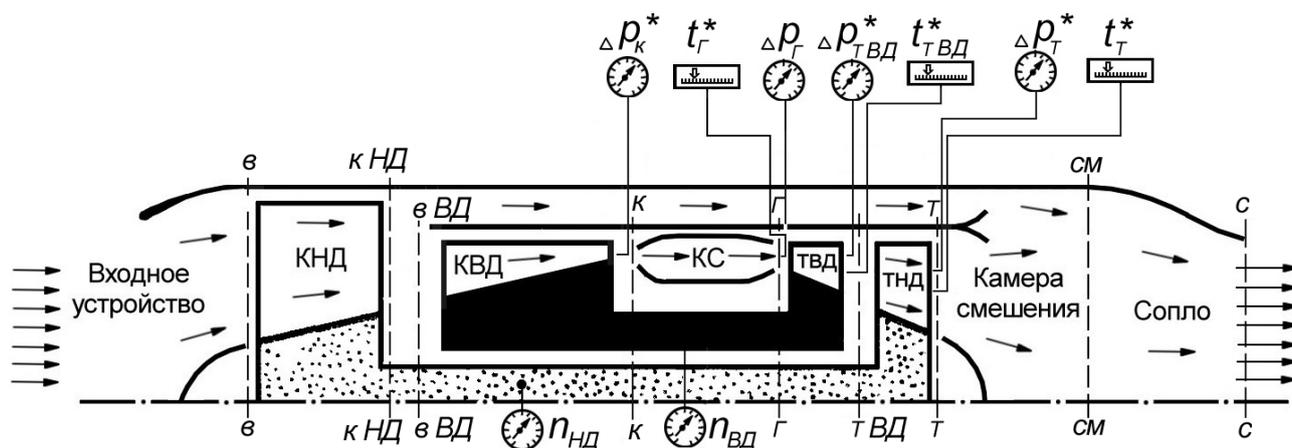


Рис. 4.1. Система измерений параметров газа в турбине

Таблица 4.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
$n_{НД}$	0.75	0.775	0.8	0.825	0.85	0.875	0.9
$\Delta p_k^*$ , дел. шкалы	174,8	187,4	200,3	214,8	230,9	245,6	261,5
$\Delta p_Г$ , дел. шкалы	165,5	177,5	189,7	203,5	218,7	232,6	247,7
$\Delta p_{ТВД}^*$ , дел. шкалы	56,4	61,5	66,8	72,7	79,3	85,2	91,7
$\Delta p_Т^*$ , дел. шкалы	44,6	55,8	65,2	75,6	87,8	98	109,7
$t_Г^*$ , °C	952,4	987,5	1022,4	1060,5	1102,2	1139,8	1178,5
$t_{ТВД}^*$ , °C	642,4	668,5	694,6	723,1	754,3	782,4	811,3
$t_Т^*$ , °C	460,2	472,4	485,7	501,6	518,7	534,5	550,3

Таблица 4.2

Вариант	8	9	10	11	12	13
$n_{\text{нд}}$	0.925	0.95	0.975	1.0	1.025	1,05
$\Delta p_{\text{к}}^*$ , дел. шкалы	277,9	293,5	309,3	324,3	339,3	353,8
$\Delta p_{\text{г}}$ , дел. шкалы	263,2	278,1	293	307,2	321,4	335,1
$\Delta p_{\text{тВД}}^*$ , дел. шкалы	98,3	104,7	111,1	117,2	123,2	129,1
$\Delta p_{\text{т}}^*$ , дел. шкалы	121,4	132,4	143,7	154,3	164,7	174,2
$t_{\text{г}}^*$ , °C	1218,8	1257,8	1296,9	1332,7	1369,1	1405,9
$t_{\text{тВД}}^*$ , °C	841,4	870,5	899,8	926,5	953,7	981,2
$t_{\text{т}}^*$ , °C	566,3	582,6	597,9	612,9	629,3	645,3

### 4.3. Обработка результатов эксперимента

Каждый студент по указанию преподавателя выполняет обработку результатов измерений газового потока в тракте турбины по одному из вариантов, представленных в табл. 4.1 или в табл. 4.2.

Используя результаты этих измерений, следует определить параметры каскадов турбин, указанные в табл. 4.3.

**Примечание:**  $B_0=760$  мм рт. ст. – атмосферное давление.

Таблица 4.3

1	Формула для расчета параметра	Численное значение параметра	Размерность параметра
2	$p_{\text{г}}^*$		
3	$p_{\text{г}}$		
4	$p_{\text{тВД}}^*$		
5	$p_{\text{т}}^*$		
6	$\pi_{\text{тВД}}^*$		
7	$\pi_{\text{тнд}}^*$		
8	$T_{\text{г}}^*$		
9	$T_{\text{тВД}}^*$		
10	$T_{\text{т}}^*$		
11	$L_{\text{тВД}}$		
12	$\eta_{\text{тВД}}^*$		
13	$L_{\text{тнд}}$		
14	$\eta_{\text{тнд}}^*$		
15	$\Pi \lambda_{\text{т}}$		

	Формула для расчета параметра	Численное значение параметра	Размерность параметра
16	$\lambda_T$		
17	$q \lambda_T$		
18	$G_T$		
19	$G_{Z \text{ ТВД}}$		
20	$G_{Z \text{ ТНД}}$		
21	$\frac{L_{\text{ТВД}}}{T_{\Gamma}^*}$		
22	$\frac{L_{\text{ТНД}}}{T_{\text{ТВД}}^*}$		
23	$c_{a \Gamma}$		
24	$q \lambda_{T \text{ ВД}}$		
25	$\lambda_{T \text{ ВД}}$		
26	$c_{a \text{ ТВД}}$		
27	$q \lambda_T$		
28	$\lambda_T$		
29	$c_{a \text{ Т}}$		

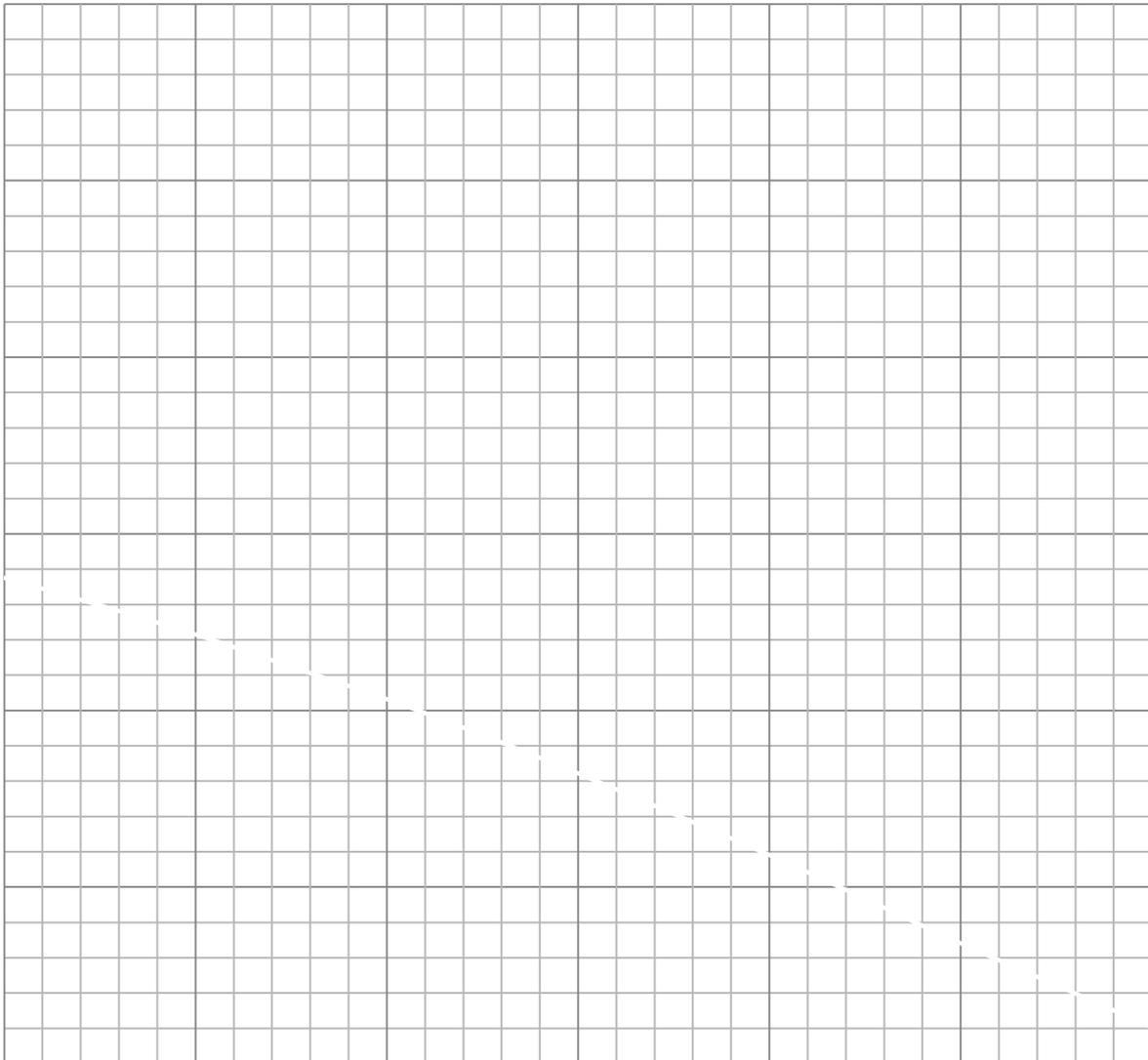
#### 4.4. Ответность по лабораторной работе

**Отчет по лабораторной работе должен содержать:**

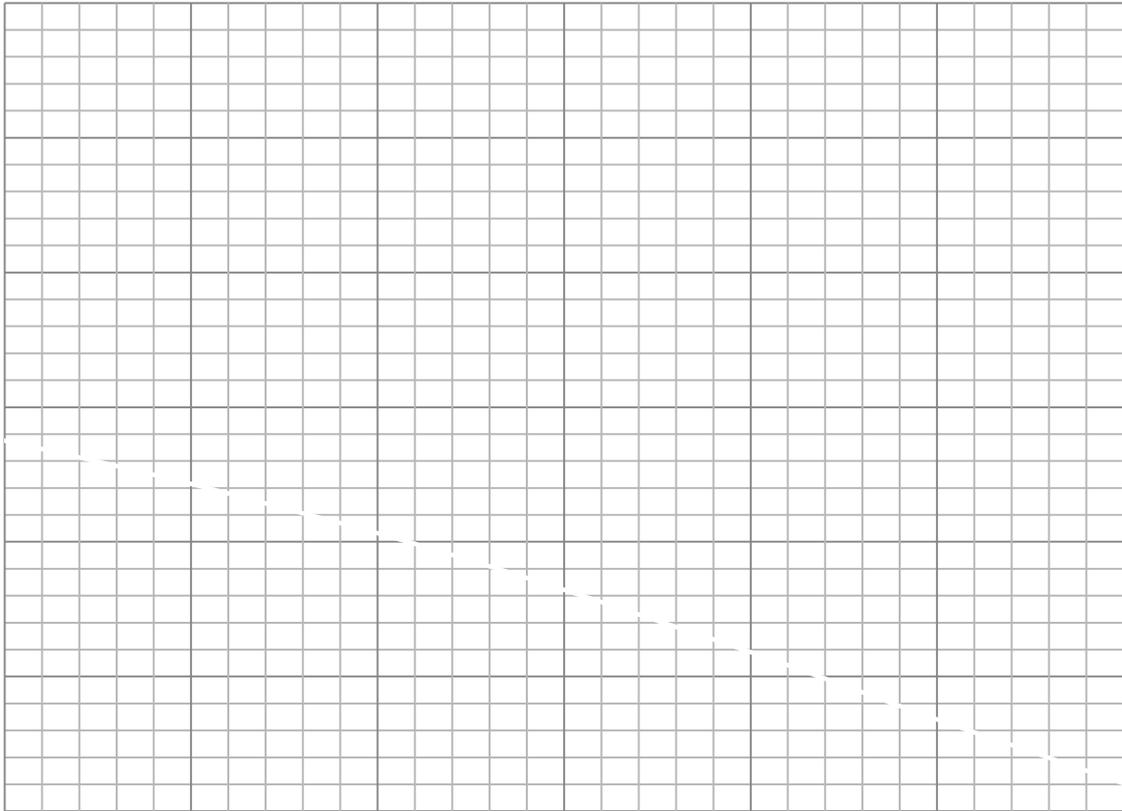
1. Протокол в виде табл. 4.3, содержащий порядок обработки результатов эксперимента и результаты расчетов.

2. Несколько графиков (по указанию преподавателя), например,  $\eta_{\text{ТВД}}^* = f n_{\text{нд}}$ ,  $\eta_{\text{ТНД}}^* = f n_{\text{нд}}$ ,  $L_{\text{ТВД}} T_{\text{Г}}^* = f n_{\text{нд}}$ ,  $L_{\text{ТНД}} T_{\text{ТВД}}^* = f n_{\text{нд}}$ ,  $G_{\text{ЗТВД}} = f n_{\text{нд}}$ ,

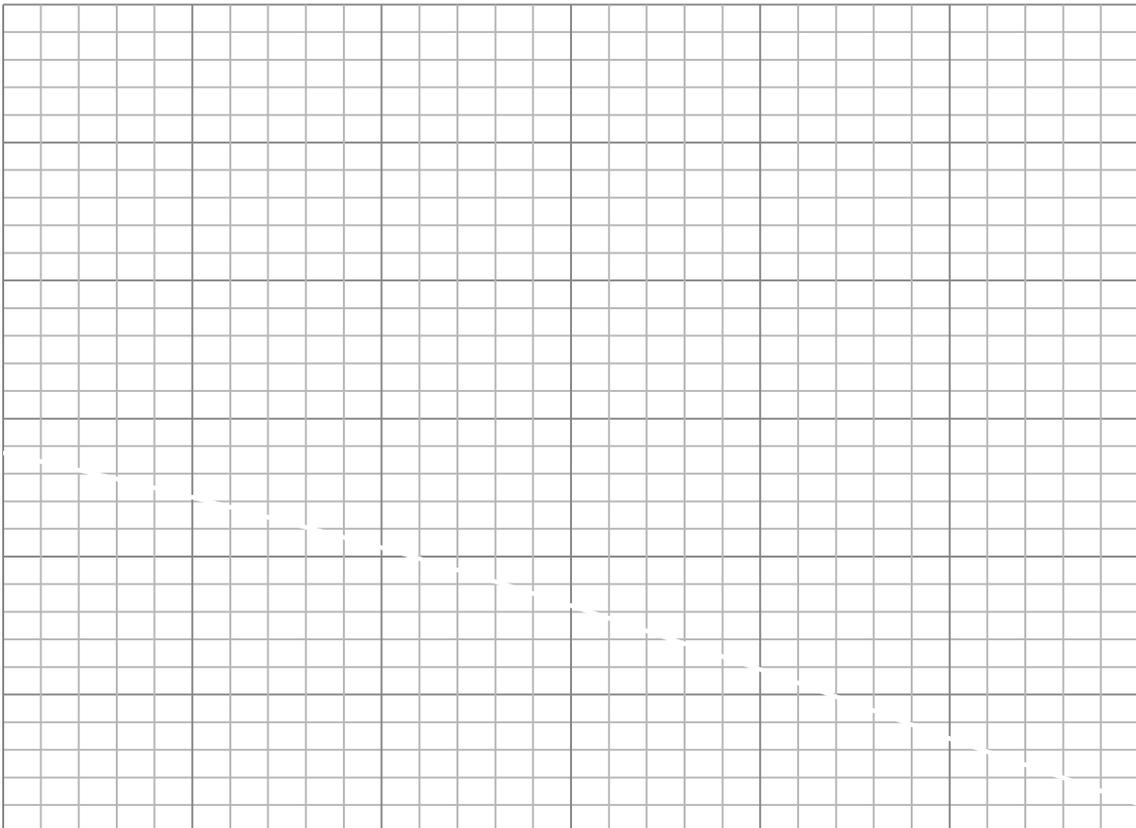
$G_{\text{ЗТНД}} = f n_{\text{нд}}$ ,  $c_{\text{аг}} = f n_{\text{нд}}$ ,  $c_{\text{аТВД}} = f n_{\text{нд}}$ ,  $c_{\text{аг}} = f n_{\text{нд}}$ , построенных с использованием результатов расчетов по заданному преподавателем варианту и по результатам вариантов других студентов.



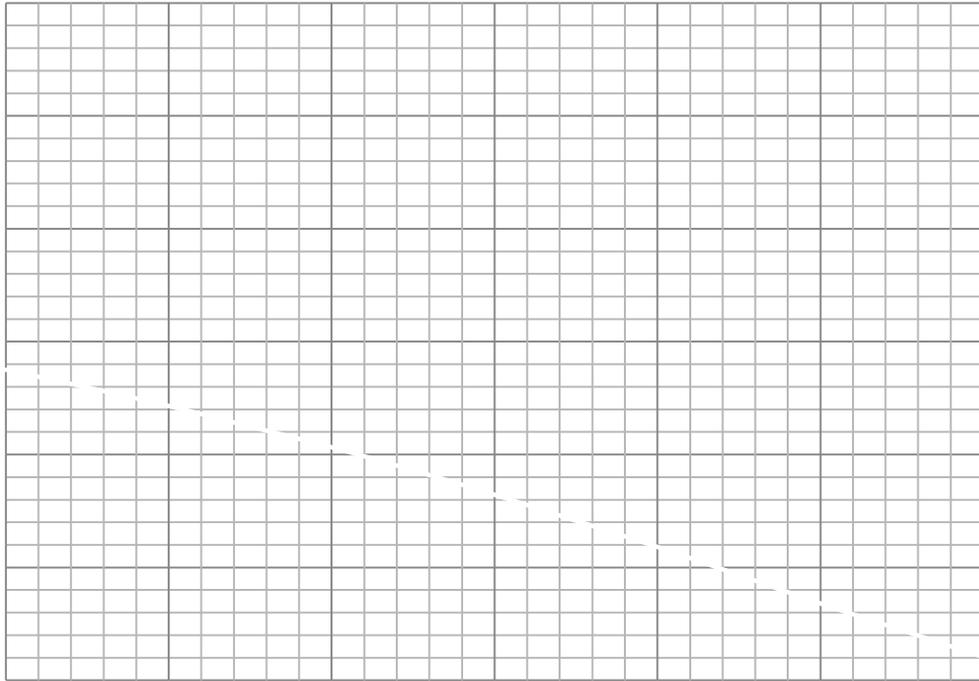
Место для построения графика



Место для построения графика



Место для построения графика



Место для построения графика

#### 4.5. Контрольные вопросы

1. Для чего предназначена турбина, входящая в состав авиационного газотурбинного двигателя?
2. Как изменяются давление, температура и скорость потока газа при его прохождении через турбину?
3. Назовите основные параметры ступени турбины.
4. Запишите формулы и поясните физическую сущность различных КПД, оценивающих эффективность работы ступени турбины.
5. Объясните как влияет изменение  $\pi_{ст}^*$  на течение газа в ступени турбины.
6. Что называется характеристикой турбины, в каких координатах она изображается?
7. Расскажите, как зависит расход газа через ступень турбины (параметр расхода) от  $\pi_{ст}^*$  и  $\lambda_{II}$ .
8. Какие потери существуют в ступени турбины?
9. Изобразите и объясните зависимость параметра работы на валу ступени турбины  $L_{ст}/T_0^*$  от  $\pi_{ст}^*$ .
10. Изобразите и объясните зависимость КПД ступени  $\eta_{ст}^*$  от  $\pi_{ст}^*$ .
11. Расскажите о системе измерений параметров газового потока в каскадах турбины двигателя.
12. Как определяются КПД ступени турбины  $\eta_{ст}^*$  при испытаниях двигателя?

« » \_\_\_\_\_ 201 г.      Студент \_\_\_\_\_

Подпись

ФИО

## Определение основных параметров камеры сгорания по результатам стендовых испытаний ТРДДсм

### 5.1. Цель и содержание работы

1. Изучение процессов, происходящих в камере сгорания.
2. Изучение системы измерения параметров воздуха и газа в проточной части камеры сгорания с целью определения её параметров.
3. Освоение методики обработки результатов экспериментального определения параметров потока воздуха и газа в проточной части камеры сгорания с целью определения её параметров.

### 5.2. Объект испытаний и система измерений

В данной лабораторной работе объектом испытаний является камера сгорания ТРДДсм.

Стенд, на котором установлен двигатель, оснащен приборами для измерения параметров воздуха и газа перед камерой сгорания и за ней (рис. 5.1).

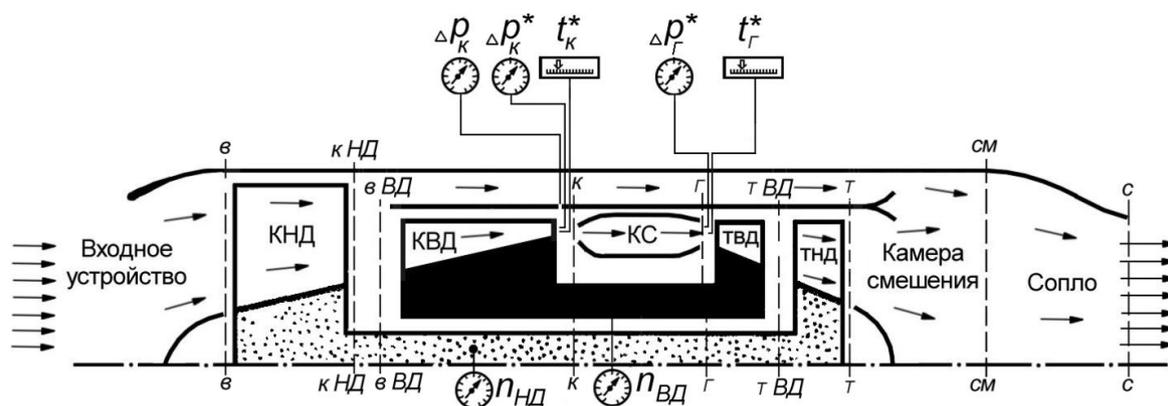


Рис. 5.1. Система измерений параметров газа в камере сгорания

Результаты измерений параметров газового потока представлены в табл. 5.1 и табл. 5.2.

Таблица 5.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
$n_{НД пр}$	0,75	0,775	0,8	0,825	0,85	0,875	0,9
$\Delta p_K^*$ , дел. шкалы	174,8	187,4	200,3	214,8	230,9	245,6	261,5
$\Delta p_K$ , дел. шкалы	167,2	179,3	191,8	205,8	221,3	235,5	250,8
$t_K^*$ , °С	437,5	451,5	466,4	482,4	499,4	515,1	530,5
$\Delta p_Г^*$ , дел. шкалы	169,6	181,8	194,3	208,4	224	238,2	253,7
$t_Г^*$ , °С	952,4	987,5	1022,4	1060,5	1102,2	1139,8	1178,5
$G_Г$ , кг/с	0,787	0,86	0,944	1,034	1,13	1,231	1,336

Таблица 5.2

Вариант	8	9	10	11	12	13
$n_{\text{нд пр}}$	0,925	0,95	0,975	1	1,025	1,05
$\Delta p_{\text{к}}^*$ , дел. шкалы	277,9	293,5	309,3	324,3	339,3	353,8
$\Delta p_{\text{к}}$ , дел. шкалы	266,7	281,8	297	311,6	326	340
$t_{\text{к}}^*$ , °C	546,7	563,1	579,6	594,7	609,8	625
$\Delta p_{\text{г}}^*$ , дел. шкалы	269,6	284,7	300	314,6	329,1	343,2
$t_{\text{г}}^*$ , °C	1218,8	1257,8	1296,9	1332,7	1369,1	1405,9
$G_{\text{т}}$ , кг/с	1,444	1,555	1,666	1,776	1,887	1,997

Таблица 5.3

1	Формула для расчета параметра	Численное значение параметра	Размерность параметра
2	$p_{\text{к}}^*$		
3	$p_{\text{к}}$		
4	$p_{\text{г}}^*$		
5	$T_{\text{к}}^*$		
6	$T_{\text{г}}^*$		
7	$\Pi \lambda_{\text{к}}$		
8	$\lambda_{\text{к}}$		
9	$q \lambda_{\text{к}}$		
10	$G_{\text{вл}}$		
11	$\alpha$		
12	$c_{\text{п}}$		
13	$Q$		
14	$Q_0$		
15	$\eta_{\text{г}}$		
16	$\sigma_{\text{кс}}$		

### 5.3. Обработка результатов эксперимента

Каждый студент по указанию преподавателя выполняет обработку результатов измерений газового потока в тракте камеры сгорания по одному из вариантов, представленных в табл. 5.1 или в табл. 5.2.

Используя результаты этих измерений, следует определить параметры, указанные в табл. 5.3.

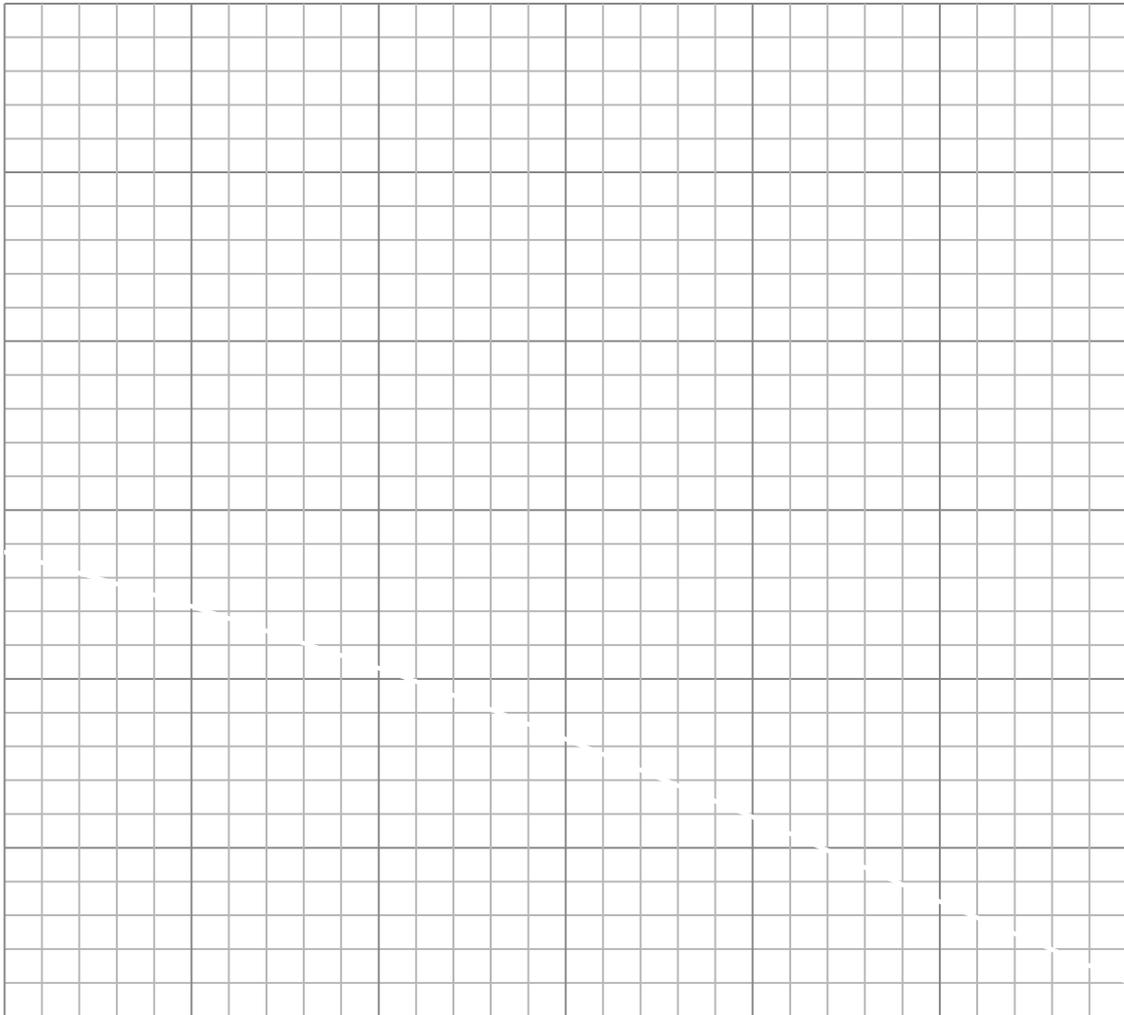
**Примечание:**  $B_0=760$  мм рт. ст. – атмосферное давление.

### 5.4. Отчетность по лабораторной работе

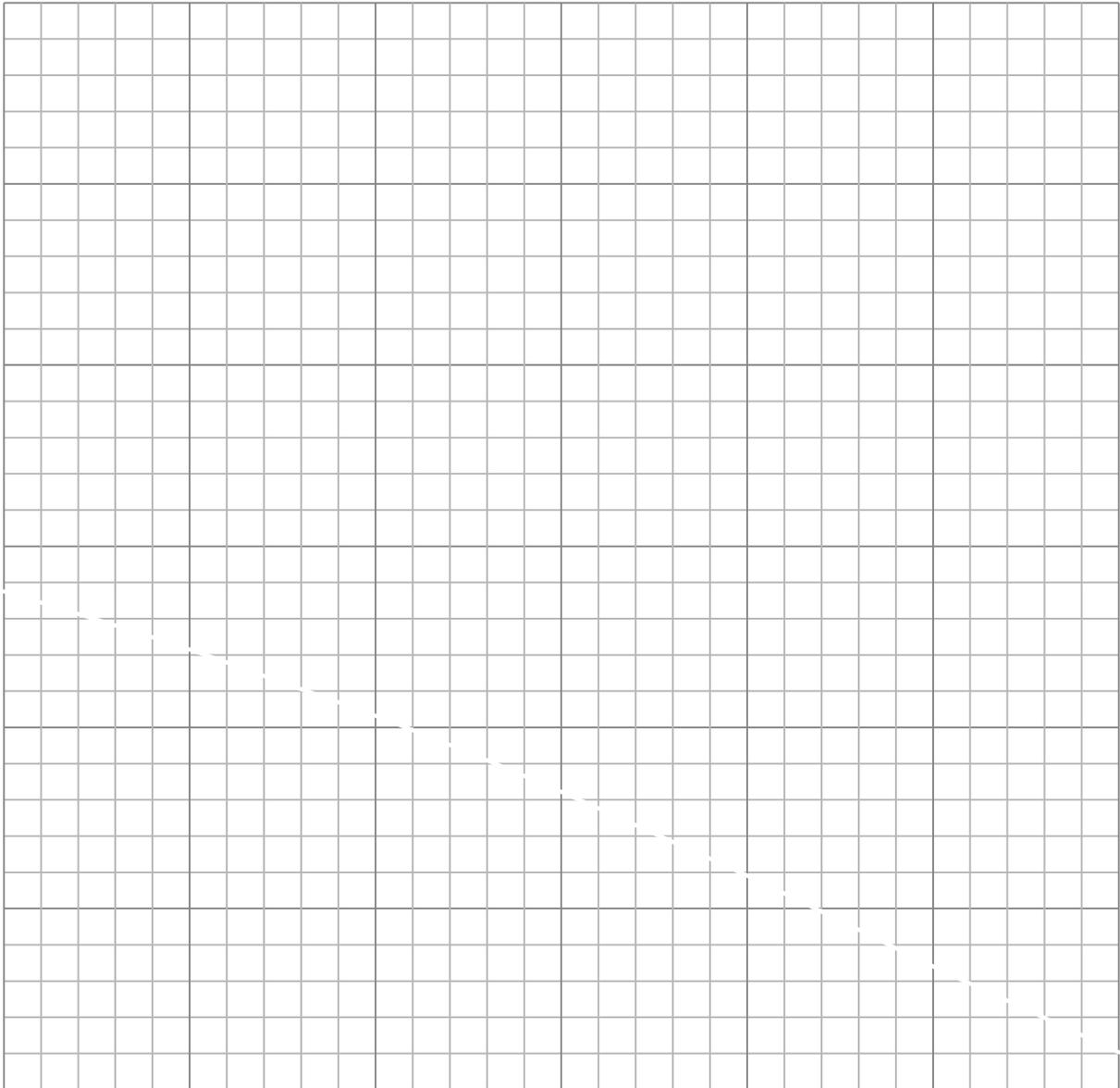
*Отчет по лабораторной работе должен содержать:*

1. Протокол в виде табл. 5.3, содержащий порядок обработки результатов эксперимента и результаты расчетов.

2. Графики зависимостей  $\alpha = f n_{нд}$ ,  $\eta_{г}^* = f n_{нд}$ ,  $\sigma_{кс} = f n_{нд}$ , построенные с использованием полученных расчетом результатов по заданному преподавателем варианту и вариантам других студентов.



Место для построения графика



Место для построения графика

### 5.5. Контрольные вопросы

1. Как организуется процесс горения топлива в камерах сгорания?
2. Какими причинами вызывается снижение полного давления потока в камере сгорания?
3. Объясните влияние коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  на полноту сгорания топлива.
4. Каковы причины срыва пламени в камере при предельных значениях  $\alpha$ ?
5. Расскажите (по рис. 5.1), каким образом измерялись параметры газа в камере сгорания.

« » \_\_\_\_\_ 201 г.      Студент \_\_\_\_\_  
Подпись                      ФИО

## Экспериментальное определение дроссельной характеристики ТРДДсм на стенде

### 6.1. Цель и содержание работы

1. Изучение устройства стенда, предназначенного для испытаний авиационных ГТД.
2. Ознакомление с измерительной аппаратурой и методами регистрации параметров рабочего процесса ГТД на установившихся режимах его работы.
3. Экспериментальное определение дроссельных характеристик ТРДДсм.
4. Построение и анализ дроссельной характеристики ТРДДсм.

### 6.2. Объект испытаний и система измерений

В данной лабораторной работе объектом испытаний является двухконтурный двухвальный турбореактивный двигатель со смешением потоков (ТРДДсм). Схема двигателя и системы измерения параметров воздуха и газа в различных сечениях двигателя представлена на рис. 6.1.

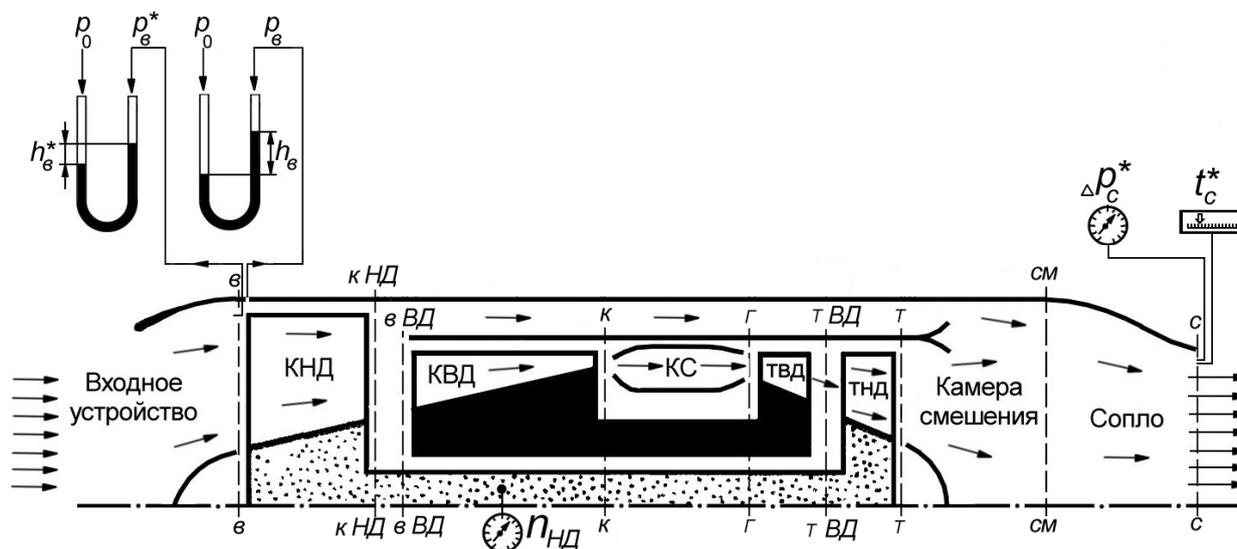


Рис. 6.1. Схема двигателя и системы измерения

Для определения параметров, характеризующих режим работы двигателя, предусмотрено измерение параметров потока, представленных в табл. 6.1 и табл. 6.2.

Таблица 6.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7
$n_{НД}$	0,75	0,775	0,8	0,825	0,85	0,875	0,9
$h_{в, \text{ мм вод. ст.}}$	-1271,9	-1351,5	-1435,4	-1528,5	-1621,9	-1725,6	-1836,1
$h_{в}^*, \text{ мм вод. ст.}$	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2
$\Delta p_c^*, \text{ дел. шкалы}$	111,6	129,4	147,2	165,3	184,6	203,9	224
$t_c^*, \text{ }^\circ\text{C}$	107,4	113,4	120	127,2	134,7	142,2	149,4
$G_T, \text{ кг/с}$	0,787	0,86	0,944	1,034	1,13	1,231	1,336

Таблица 6.2

Вариант	8	9	10	11	12	13
$n_{нд}$	0.925	0.95	0.975	1.0	1.025	1,05
$h_{в}$ , мм вод. ст.	-1953,4	-2071,7	-2198,2	-2326,8	-2447,4	-2568,8
$h_{в}^*$ , мм вод. ст.	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2	-42,2
$\Delta p_{с}$ , дел. шкалы	244,1	264,5	283,8	302,7	320,5	337,2
$t_{с}^*$ , °C	156,9	164,4	171,6	178,5	185,7	192,9
$G_{т}$ , кг/с	1,444	1,555	1,666	1,776	1,887	1,997

### 6.3. Порядок обработки результатов эксперимента

Каждый студент по указанию преподавателя выполняет обработку результатов измерений газового потока в тракте двигателя по одному из вариантов, представленных в табл. 6.1 или в табл. 6.2.

Используя результаты этих измерений, следует определить значения параметров, представленных в табл. 6.3.

**Примечание:** 1. При вычислении  $p_{в}$  и  $p_{в}^*$  необходимо учитывать знаки  $h_{в}$  и  $h_{в}^*$ , указанные в табл. 6.1 и табл. 6.2;

2.  $B_0=760$  мм рт. ст. – барометрическое давление наружного воздуха.

Таблица 6.3

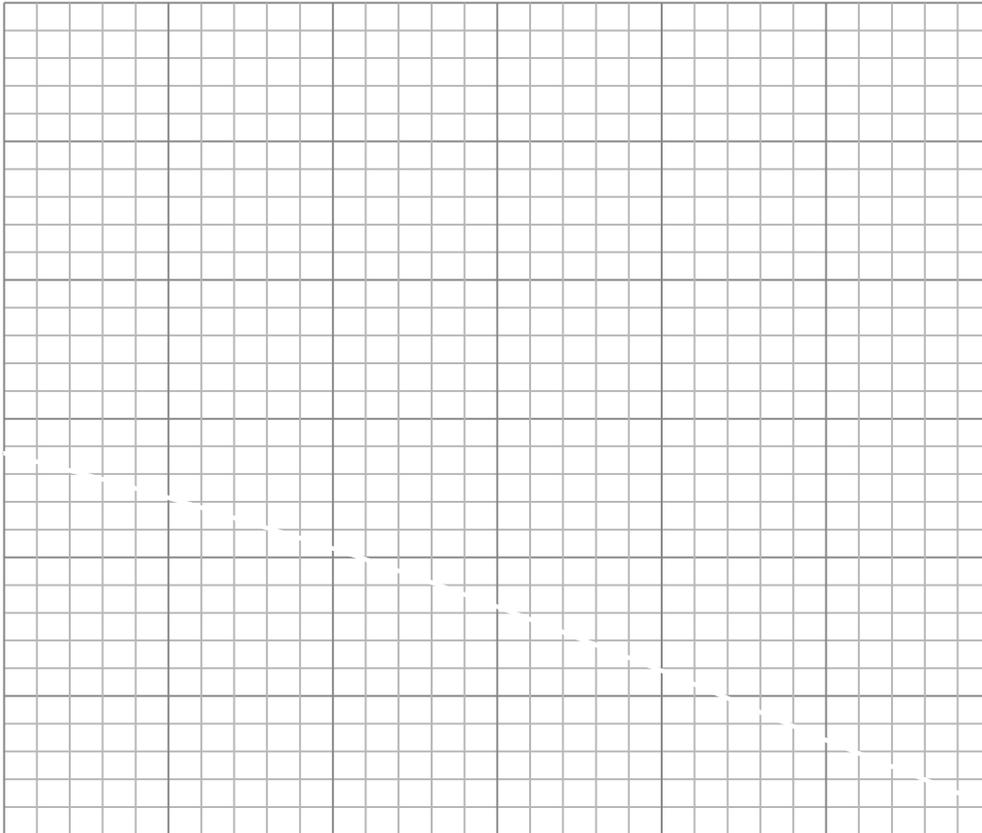
1	Формула для расчета параметра	Численное значение параметра	Размерность параметра
2	$p_{в}$		
3	$p_{в}^*$		
4	$\Pi \lambda_{в}$		
5	$\lambda_{в}$		
6	$q \lambda_{в}$		
7	$T_{в}^*$		
8	$G_{в}$		
9	$T_{с}^*$		
10	$p_{с}^*$		
11	$\pi_{с}$		

	Формула для расчета параметра	Численное значение параметра	Размерность параметра
12	$c_c$		
13	$G_T$		
14	$P$		
15	$C_{уд}$		

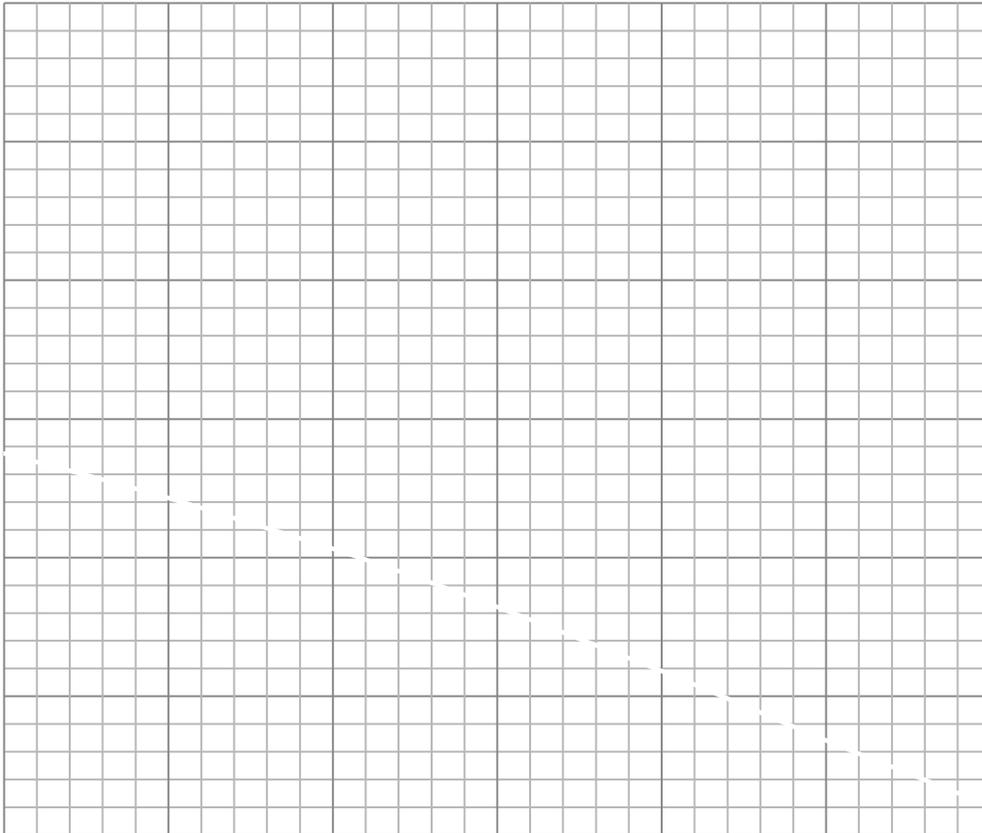
#### 6.4. Отчетность по лабораторной работе

*Отчет по лабораторной работе должен содержать:*

1. Протокол в виде табл. 6.3, содержащий изложенный в этой таблице порядок обработки результатов эксперимента и численные результаты расчетов.
2. Графики зависимостей  $P = f n_{нд}$  и  $C_{уд} = f n_{нд}$ , построенные с использованием полученных расчетом по заданному преподавателем варианту и по вариантам других студентов.



Место для построения графика



Место для построения графика

### 6.5. Контрольные вопросы

1. Что называется дроссельной характеристикой ГТД прямой реакции?
2. Расскажите об устройстве стенда для испытаний ГТД прямой реакции.
3. Какие параметры измеряются на стенде при испытаниях двигателя?
4. Расскажите о системе измерения параметров воздуха и газа в проточной части двигателя для определения его тяги.
5. Расскажите о системе измерения расхода топлива в двигателе.
6. Расскажите о методике определения расхода воздуха через двигатель.
7. Объясните характер протекания тяги и удельного расхода топлива по частоте вращения РНД.
8. Объясните характер изменения температуры газа перед турбиной по частоте вращения РНД.
9. Что называется удельным расходом топлива двигателя?
10. Что называется полным КПД двигателя?
11. Как зависит удельный расход топлива двигателя от полного КПД?

« » \_\_\_\_\_ 201 г.      Студент \_\_\_\_\_

Подпись

ФИО

## Экспериментальное определение дроссельной характеристики турбовального авиационного двигателя на стенде

### 7.1. Цель и содержание работы

1. Ознакомление с устройством стенда, предназначенного для испытаний вертолетных ГТД.
2. Ознакомление с методами измерения и регистрации параметров рабочего процесса ТВаД на установившихся режимах работы.
3. Определение и анализ дроссельной характеристики вертолетного ТВаД по результатам его стендовых испытаний.

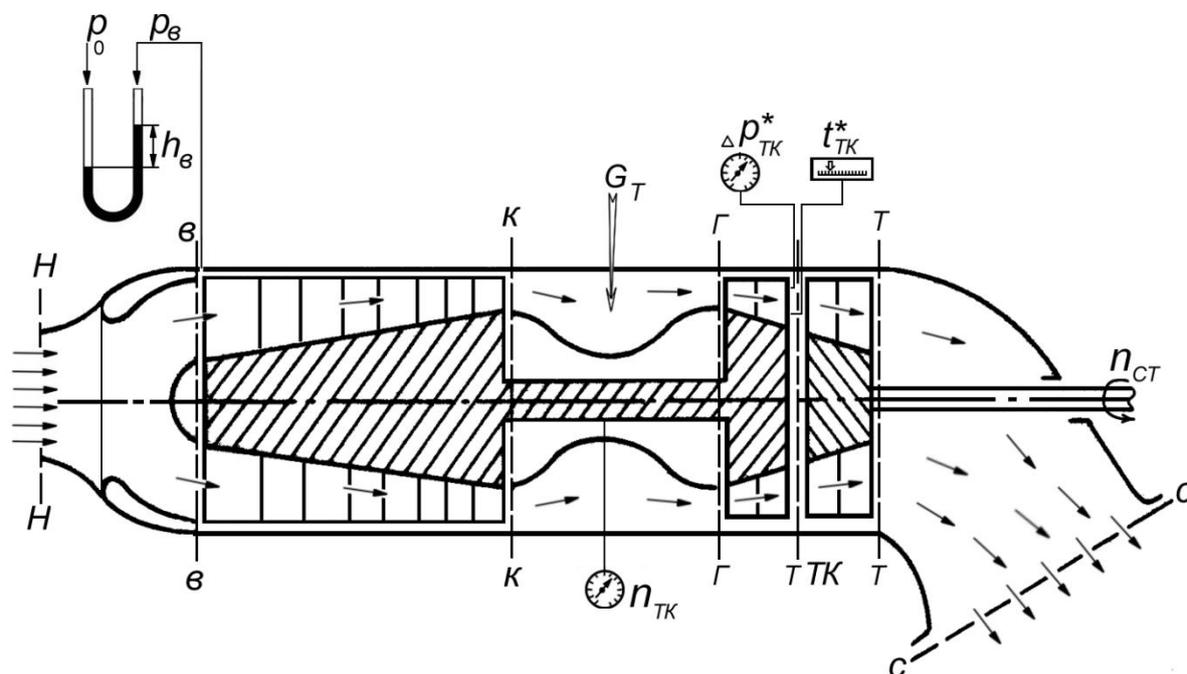


Рис. 7.1. Схема двигателя и система измерений параметров потока

### 7.2. Схема двигателя и системы измерений

В данной лабораторной работе дроссельная характеристика турбовального авиационного двигателя (ТВаД) определяется не непосредственным измерением его мощности и расхода топлива, а путем измерения его газодинамических параметров с последующим вычислением  $N_e$  и  $C_e$ .

Схема двигателя и система измерения параметров воздуха и газа в различных сечениях двигателя представлена на рис 7.1.

Для определения параметров, характеризующих режим работы двигателя, предусмотрено измерение параметров потока, представленных в табл. 7.1 и табл. 7.2.

Таблица 7.1

Вариант	1	2	3	4	5	6
$n_{TK}$	1	0,98	0,96	0,94	0,92	0,9
$h_b$ , мм вод. ст.	-2312,8	-2058,4	-1836	-1634,7	-1451,1	-1287,1
$\Delta p_{TK}^*$ , делен. шкалы	258,9	232	205,1	179,8	156	132,2
$t_{TK}^*$ , °C	669,5	629	588,4	550,5	515,4	480,2
$G_{TЧ}$ , кг/ч	478,21	428,55	378,88	334,07	294,1	254,14

Таблица 7.2

Вариант	7	8	9	10	11
$n_{TK}$	0,88	0,86	0,84	0,82	0,8
$h_b$ , мм вод. ст.	-1140,6	-1009,5	-895,9	-797,5	-709,4
$\Delta p_{TK}^*$ , делен. шкалы	114,6	97	82,2	70,2	58,1
$t_{TK}^*$ , °C	458,6	436,9	420,2	408,6	396,9
$G_{TЧ}$ , кг/ч	226,59	199,04	176,73	159,66	142,59

### 7.3. Порядок обработки результатов эксперимента

Каждый студент по указанию преподавателя выполняет обработку результатов измерений газового потока в тракте двигателя по одному из вариантов, представленных в табл. 7.1 или в табл. 7.2.

Используя результаты этих измерений, следует определить значения представленных в табл. 7.3 параметров.

**Примечания:** 1.  $B_0=760$  мм рт. ст. – барометрическое давление наружного воздуха.

2. При определении работы свободной турбины её коэффициент полезного действия  $\eta_{ст}$  следует определять по рис. 7.2.

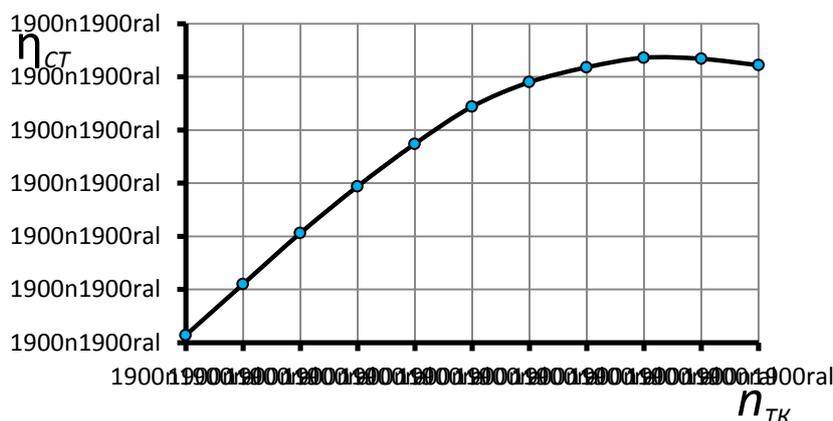


Рис. 7.2. Зависимость коэффициента полезного действия свободной турбины от частоты вращения ротора турбокомпрессора

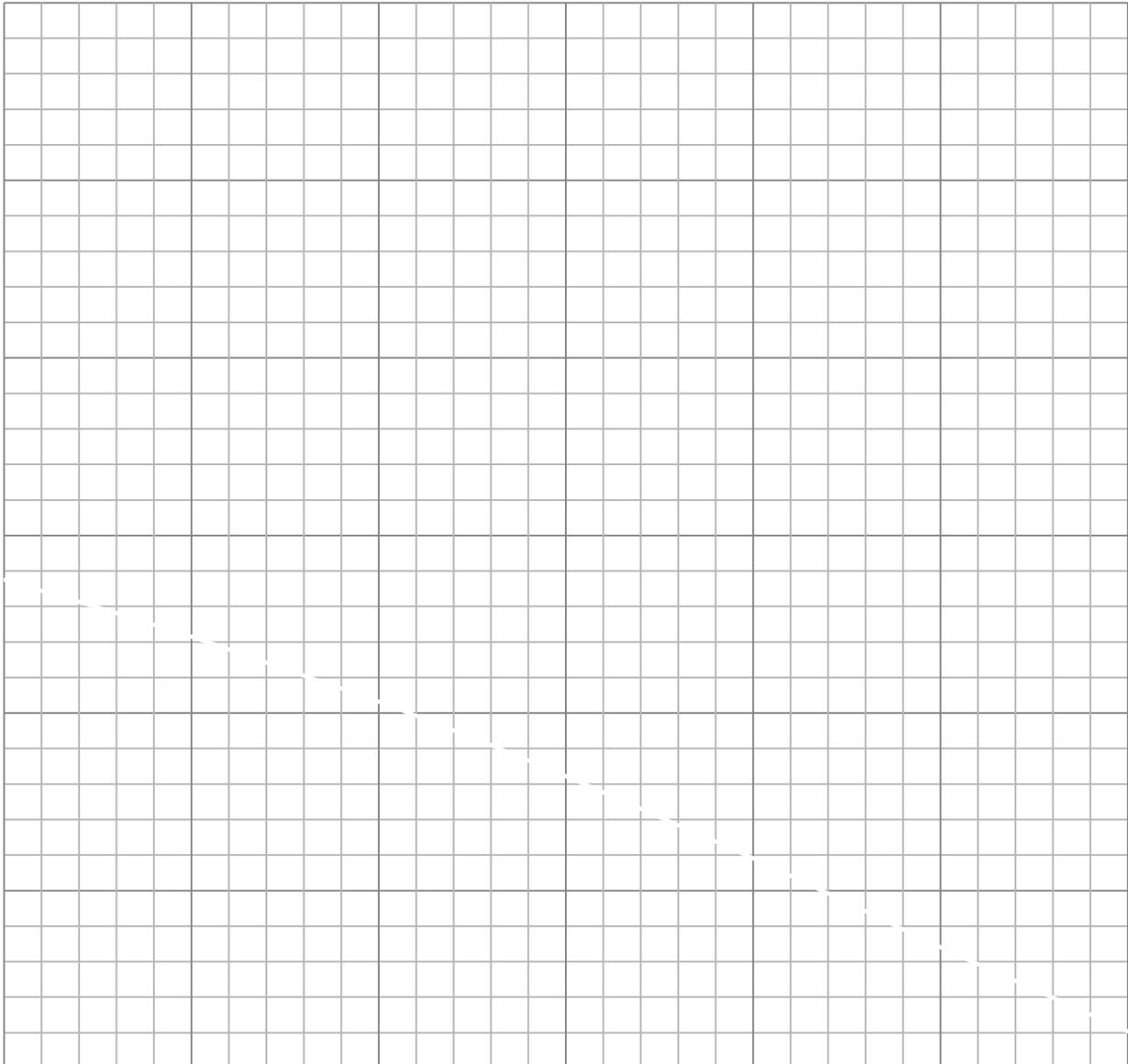
Таблица 7.3

1	Формула для расчета параметра	Численное значение параметра	Размерность параметра
2	$p_B$		
3	$p_{ТТК}^*$		
4	$T_{ТТК}^*$		
5	$\pi_{ст}$		
6	$L_{ст}$		
7	$\pi \lambda_B$		
8	$\lambda_B$		
9	$q \lambda_B$		
10	$G_B$		
11	$N_e$		
12	$C_e$		

### 7.6. Отчетность по лабораторной работе

*Отчет по лабораторной работе должен содержать:*

1. Протокол в виде табл. 7.3, содержащий порядок обработки результатов эксперимента и численные результаты расчетов.
2. Графики зависимостей  $N_e = f n_{ТК}$  и  $C_e = f n_{ТК}$ , построенные с использованием результатов, полученных расчетом по заданному преподавателем варианту, и результатов вариантов других студентов.



Место для построения графика

### 7.7. Контрольные вопросы

1. Что называется дроссельной характеристикой ТВаД?
2. Расскажите об устройстве типичного стенда для испытания ТВаД.
3. Какие параметры воздуха и газа необходимо измерять на стенде для определения дроссельной характеристики ТВаД?
4. Что называется удельным расходом топлива ТВаД?
5. Как измерялся расход топлива при испытаниях ТВаД?
6. Как определялся расход воздуха через двигатель?
7. Расскажите об особенностях управления вертолетным двигателем.
8. Объясните протекание дроссельной характеристики ТВаД.

« » \_\_\_\_\_ 201 г.      Студент \_\_\_\_\_

Подпись

ФИО

## Лабораторная работа № 8

## Определение оптимальной величины обратной тяги двигателей воздушного судна Ту-154М

### 8.1. Цель и содержание работы

1. Ознакомление с процессом торможения воздушного судна (ВС) на пробеге с применением реверса тяги.
2. Изучение влияния реверса тяги и различных факторов на длину пробега ВС.
3. Практическое определение оптимальной величины обратной тяги двигателей для самолета Ту-154М.
4. Приобретение навыков расчетного определения оптимальной величины обратной тяги двигателей воздушного судна.

### 8.2. Объект исследований

В данной лабораторной работе объектом исследования является воздушное судно Ту-154М.

### 8.3. Исходные данные

$p_H = 760$  мм рт. ст. =  $101325$  Н/м<sup>2</sup> – давление наружного воздуха;

$T_H = 288$  К – температура наружного воздуха;

$\rho_H = \frac{p_H}{RT_H} = \frac{101325}{287 \cdot 288} = 1,226$   $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – плотность наружного воздуха;

$S_{\text{кр}} = 180$  м<sup>2</sup> – площадь крыла;

$C_x = 0,188$  – коэффициент лобового сопротивления;

$C_y = 0,752$  – коэффициент подъёмной силы;

$g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;

$R_{\text{обр max}} = 3600$  кг/с – максимальная обратная тяга двигателя Д-30КУ-154;

$R_{\text{обр мг}} = 400$  кг/с – обратная тяга двигателя Д-30КУ-154 на режиме "малый реверс";

$P_{\text{мг}} = 940$  кг/с – прямая тяга одного двигателя Д-30КУ-154 на режиме "малый газ";

$G_{\text{в max}} = 350$  кг/с – расход воздуха через двигатель на максимальном продолжительном (номинальном) режиме работы двигателя Д-30КУ-154;

$G_{\text{в мг}} = 81,5$  кг/с – то же на режиме малого газа;

$m_{\text{пос}} = 75000$  кг – посадочная масса ВС Ту-154М.

### *Эксплуатационные факторы, влияющие на длину пробега ВС*

1. Состояние взлетно-посадочной полосы

Коэффициент сцепления  $\mu$  во время эксплуатации взлетно-посадочной полосы аэропорта определяется наземными службами с помощью акселерометра, установленного на специальном автомобиле. Его значение передаётся по радио экипажу самолета перед посадкой.

В табл. 8.1 приведены значения коэффициента сцепления  $\mu$  и трения  $f$  для различных состояний взлетно-посадочной полосы.

Таблица 8.1

Состояние поверхности ВПП	Средний коэффициент сцепления $\mu$	Средний коэффициент сопротивления качению $f$
Сухая цементная ВПП	0,7...0,8	0,2...0,3
Влажная ВПП (слегка смоченная влагой после дождя, без скоплений воды)	0,5...0,6	0,1...0,15
Мокрая ВПП (слой воды толщиной 2. . . 3 мм)	0,4...0,5	0,07...0,1
Скользкая ВПП (покрыта слякотью, то есть насыщена водой или снегом)	0,3...0,35	0,05...0,07
Гладкий лед или укатанный снег	0,05	0,03...0,05
Мокрый лед, без тормозов (колеса вращаются, но диски не сжимаются)	0...0,03	0,010...0,015

## 2. Высота аэродрома

Высота аэродрома  $H_{\text{аэр}} = 0 \text{ м}, 500 \text{ м}, 1000 \text{ м}, 1500 \text{ м}$ .

В случае задания высоты аэродрома более нулевой ( $H_{\text{аэр}} > 0$ ) величины обратной тяги и расходов воздуха при реверсировании и на режиме малого газа определяются приближенно по формулам:

$$R_{\text{обр}} = R_{\text{обр сау}} \frac{101325}{P_H}; \quad G_{\text{в реверс}} = G_{\text{в реверс сау}} \frac{101325}{P_H} \sqrt{\frac{T_H}{288}};$$

$$R_{\text{мг}} = R_{\text{мг сау}} \frac{101325}{P_H}; \quad G_{\text{в мг}} = G_{\text{в мг сау}} \frac{101325}{P_H} \sqrt{\frac{T_H}{288}};$$

3. Посадочная масса ВС 80000 кг, 70000 кг, 60000 кг.

## 8.4. Порядок выполнения работы

1. Группа студентов распределяется на подгруппы по 2 - 3 чел.

2. Каждой подгруппе ставится задача определить:

а) длину пробега воздушного судна по ВПП при различных состояниях поверхности ВПП и методиках применения реверса тяги:  $L=f(f, \text{методики применения реверса тяги})$ . Скорость пробега ВС, на которой выключают реверс тяги, определяют по скорости пробега ВС, на которой начинается заброс в двигатели реверсивных струй (рис. 8.1);

б) длину пробега воздушного судна при различном времени включения реверса тяги после касания поверхности ВПП и различных методиках применения реверса тяги:  $L=f(\tau, \text{методики применения реверса тяги})$ ;

в) длину пробега воздушного судна при различных высотах аэродрома и методиках применения реверса тяги:  $L=f(H_{\text{аэр}}, \text{методики применения реверса тяги})$ ;

г) длину пробега воздушного судна при различных посадочных массах ВС и высотах аэродрома:  $L=f(m_{\text{пос}}, H_{\text{аэр}})$ ;

3. Каждая подгруппа при заданных условиях в п. 8.3 определяет длину пробега ВС по ВПП.

4. На основании полученных результатов проводится анализ влияния реверса тяги и различных эксплуатационных факторов на длину пробега ВС.



$V_{\text{выкл ру}}$	33,3	47,3								
$V_{\text{руления}}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\mu$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$\tau_1$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\tau_2$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$\tau_3$	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
$\tau_4$	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
$\tau_5$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$L, \text{ м}$										
$\Delta L, \text{ м}$										
$\Delta L, \%$										

\*в выделенных строках таблицы исходные данные не изменяются.

### Особенности расчета

1. Для возможности определения длины пробега ВС при штатном применении методики реверса тяги значение величины малого реверса принимать равной  $P_{\text{мг}} = -400$  кг.
2. Время включения реверса тяги принимать равным следующим значениям:  $\tau_1 = 0$  с, 1 с, 2 с, 3 с и 4 с.
3. Время перекладки створок реверса в положение на обратную тягу  $\tau_2 = 2$  с.
4. Приемистость двигателя  $\tau_3 = 6$  с.
5. Обратная приемистость двигателя  $\tau_4 = 6$  с.
6. Время перекладки створок реверса в положение прямой тяги  $\tau_5 = 2$  с.
7. Коэффициент трения принимать для сухой цементной ВПП  $\mu = 0,7$ , скользкой ВПП  $\mu = 0,3$ , а для обледеневшей ВПП  $\mu = 0,03$ .
8. Исходные данные для различных высот аэродрома представлены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

$H_{\text{аэр}}, \text{ м}$	$P_H$	$T, \text{ К}$
0	101325	288,2
500	954613	284,9
1000	898763	281,7
1500	845597	278,4

### 8.5. Отчётность по выполнению работы

#### Отчет по лабораторной работе должен содержать

1. Результаты расчетов в виде заполненной табл. 8.2.
2. Графики изменения длин пробега ВС по ВПП в зависимости от величины обратной тяги двигателей.
3. Анализ результатов расчетов по определению оптимальной величины обратной тяги двигателя Д-30КУ-154 для самолета Ту-154М при различных эксплуатационных факторах.



## Содержание

Лабораторная работа № 1. Методы и средства измерения параметров газового потока .....	3
Лабораторная работа № 2. Экспериментальное определение параметров многоступенчатого осевого компрессора при его работе в системе авиационного ГТД.....	9
Лабораторная работа № 3. Экспериментальное исследование совместной работы крайних ступеней осевого компрессора ТРДДсм .....	14
Лабораторная работа № 4. Определение основных параметров каскадов турбины по результатам стендовых испытаний ТРДДсм .....	18
Лабораторная работа № 5. Определение основных параметров камеры сгорания по результатам стендовых испытаний ТРДДсм .....	24
Лабораторная работа № 6. Экспериментальное определение дроссельной характеристики ТРДДсм на стенде .....	28
Лабораторная работа № 7. Экспериментальное определение дроссельной характеристики турбовального авиационного двигателя на стенде .....	32
Лабораторная работа № 8. Определение оптимальной величины обратной тяги двигателей воздушного судна Ту-154М .....	36