

Министерство образования Российской Федерации.
Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королева

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЗЛОВ ВРД
И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Утверждено редакционным
советом университета
в качестве методических
указаний к лабораторным
работам по курсу «Теория,
расчет и проектирование
авиационных двигателей и
энергетических установок»

Самара 2003

УДК 629.7.036

Совместная работа узлов ВРД его характеристики /Сост.
С.К. Бочкарев, В.А. Григорьев, В.В. Кулагин.
Самарский государственный аэрокосмический университет, Самара, 2003, 36с.

В методических указаниях изложены содержание и методика проведения лабораторных работ по курсу «Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок». Основное внимание при выполнении лабораторных работ уделяется анализу полученных результатов и выводам, которые делаются студентами самостоятельно. Обязательным условием успешного проведения лабораторных работ является предварительная самостоятельная подготовка студентов. Для этого необходимо ознакомление с данными методическими указаниями и изучение соответствующих разделов курса по лекциям и рекомендованной литературе.

Указания предназначены для студентов II факультета, обучающихся по специальности 130200.

Лабораторная работа №1

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЗЛОВ ОДНОВАЛЬНОГО ТРД И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Цели лабораторной работы

1. Закрепление и углубление знаний, полученных студентами при изучении совместной работы узлов и характеристик выполненного ТРД с нерегулируемыми проходными сечениями (главы 10, 11, 12 учебника [1]).
2. Практическое знакомство с порядком и выполнением работ, проводимых при экспериментальном определении дроссельной характеристики ТРД.
3. Получение навыков самостоятельной обработки результатов эксперимента, построения линии совместной работы и дроссельной характеристики ТРД.

Порядок проведения лабораторной работы

1. Проверка готовности студентов к выполнению лабораторной работы. При домашней подготовке к лабораторной работе рекомендуется пользоваться учебником [1].
2. Ознакомление с правилами техники безопасности при испытании ТРД ТС-12 на учебном стенде СГАУ
3. Знакомство с объектом исследования ТРД ТС-12; распределение по рабочим местам.
4. Проведение испытания одновального ТРД с измерением основных параметров.
5. Обработка результатов испытания, оформление протокола, построение графиков.
6. Письменный анализ результатов испытания и сдача лабораторной работы преподавателю.

Краткое описание двигателя – объекта испытания

Турбореактивный одновальный двигатель ТС-12 выполнен для учебных целей на базе вспомогательной силовой установки (турбостартера) турбовинтового двигателя НК-12МВ (параметры двигателя ТС-12 естественно ниже параметров современных авиационных ГТД, служащих силовыми установками самолетов).

Основные данные ТРД ТС-12:

частота вращения	- 25 000 об/мин=4170 1/с;
тяга	- 60 кгс=588 Н;
часовой расход топлива	- 105 кг/ч;

температура газа за турбиной - 870 К.

Компрессор двигателя центробежный, турбина осевая. Камера сгорания – трубчато-кольцевая с пятью рабочими и одной пусковой форсунками. Сопло двигателя нерегулируемое, суживающееся. Необходимые для выполнения лабораторной работы параметры измеряются соответствующими приборами и измерительными системами. Подача и измерение расхода топлива производятся топливной системой.

Смазка двигателя осуществляется масляной системой.

Испытание двигателя, измерение основных параметров

Испытание двигателя производится в боксе учебной лаборатории. Двигатель установлен на испытательном станке. К нему подведены системы питания и измерений. Вторичные приборы систем измерений установлены на стенде.

Рабочими местами при испытании являются следующие.

1. Пульт управления. Измерение частоты вращения, давления топлива перед форсунками и тяги.

2. Щит измерения температур и давлений. Измеряются температуры и давления:

t_B^* - перед компрессором;

t_T^* - за турбиной;

Δp_K^* - избыточное давление за компрессором.

3. Пьезометрический щит. Измеряют давления:

Δp_B - перепад между заторможенным и статическим давлениями в сечении лемнискатного насадка.

В соответствии с распределением по рабочим местам студенты участвуют в испытании. Затем осуществляют первичную и вторичную обработку полученных результатов. На заключительной стадии работы производится обмен основными результатами полученных измерений, которые необходимы для построения графиков.

После запуска двигателя и его выдержки (для стабилизации параметров) по общему сигналу производят измерения на четырех установившихся режимах работы двигателя. О выполнении измерения студент сигнализирует на пульт управления при помощи включения сигнальной лампы тумблером, расположенным на каждом рабочем месте.

На рис. 1.1 показаны схема проточной части ТРД ТС-12 в компоновке с лемнискатным мерным насадком на входе и схема препарирования.

В характерных сечениях ТРД измеряются перепады давлений по сравнению с атмосферным давлением Δp_B – пьезометром, Δp_K^* - манометром. Определение температур торможения производится термопарами и термометрами сопротивления. При помощи силоизмерительного устройства измеряется тяга, развиваемая двигателем. Частота вращения фиксируется стендовым тахометром ТСФУ1-4. Расход топлива определяется по измерениям давления топлива перед форсунками. Производится еще ряд дополнительных измерений, которые необходимы для контроля за работой двигателя.

Обработка результатов измерений

Обработку результатов испытания целесообразно делить на первичную и вторичную.

Первичная обработка включает осреднение параметров и перевод из различных систем измерения в систему СИ. Так, например, при измерении давления в мм рт. ст.(мм вод. ст.) необходим перевод в Па. Кроме того, осуществляется перевод избыточных перепадов в абсолютные значения давлений.

Вторичная обработка включает приведение параметров к стандартным атмосферным условиям (САУ), а также определение некоторых параметров, например расхода воздуха, по результатам замеров.

Рассмотрим порядок проведения первичной и вторичной обработки для различных рабочих мест.

1. Пульт управления

Первичная обработка результатов измерений на данном рабочем месте сводится к пересчету значений тяги из технической системы единиц P' [кгс] в систему СИ [Н] :

$$P = P' \cdot 9,81.$$

Частота вращения ротора измеряется непосредственно в об/мин.

Полученные значения частоты вращения и тяги приводятся к стандартным атмосферным условиям, что и является вторичной обработкой.

Часовой расход топлива определяется по давлению топлива перед форсунками с помощью градуировочной зависимости (рис.1.2).

Вторичная обработка результатов измерения расхода топлива

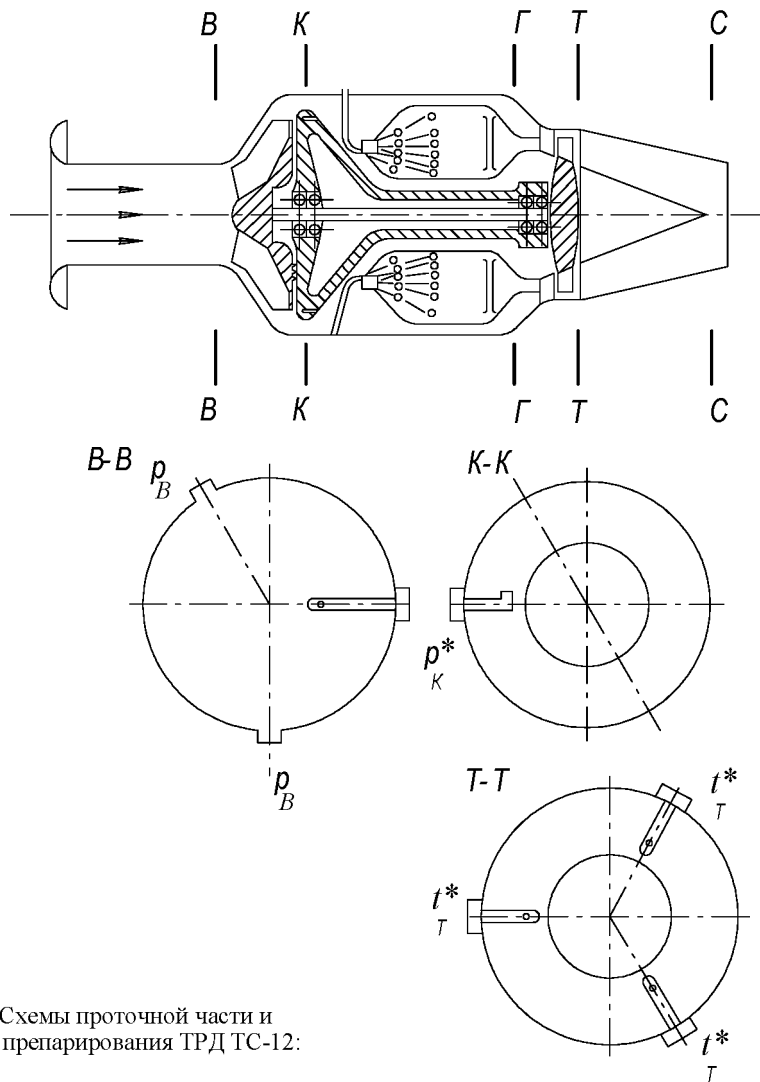
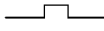
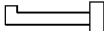
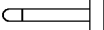


Рис.1.1. Схемы проточной части и препарирования ТРД ТС-12:

-  Приемник статического давления;
-  Приемник полного давления;
-  Термопара

заключается в вычислении удельного расхода топлива (в $\frac{\text{кг}}{\text{Нч}}$)

$$C_{уд} = \frac{G_{т.ч}}{P},$$

а также в приведении значений часового и удельного расхода топлива к САУ.

2. Щит измерения температур

Первичная обработка - осреднение и определение значений температур перед компрессором и за турбиной в градусах Кельвина:

$$T_B^* = t_B^* + 273;$$

$$T_T^* = \frac{t_{T_1}^* + t_{T_2}^* + t_{T_3}^*}{3} + 273.$$

Вторичная обработка - приведение полученных абсолютных температур к стандартным атмосферным условиям.

3. Щ и т измерения давлений

Первичная обработка - определение абсолютного значения давления по формуле $p_K^* = p_H + \Delta p_K^*$, где p_H - атмосферное давление в соответствующей размерности. Значения давлений должны быть пересчитаны в Па. Для этого используются следующие соотношения:

1 кгс/см² = 0,981 · 10⁵ Па;

1 мм вод.ст = 9,81 Па;

1мм рт.ст. = 133,36 Па.

Полученные после первичной обработки результаты измерений давлений и температуры дают возможность провести вторичную обработку и вычислить следующие параметры.

а) Степень повышения давления в компрессоре

$$\pi_K^* = \frac{p_K^*}{p_B^*}.$$

Так как потери полного давления на входе в двигатель незначительны, то принимается $p_B^* = p_H$.

б) Расход воздуха через двигатель.

Вычисляется отношение $\frac{\Delta p_B}{p_B^*}$, по величине которого с помощью зависимости, представленной на

рис. 1.3, определяется приведенный расход воздуха $G_{B,ПР}$.

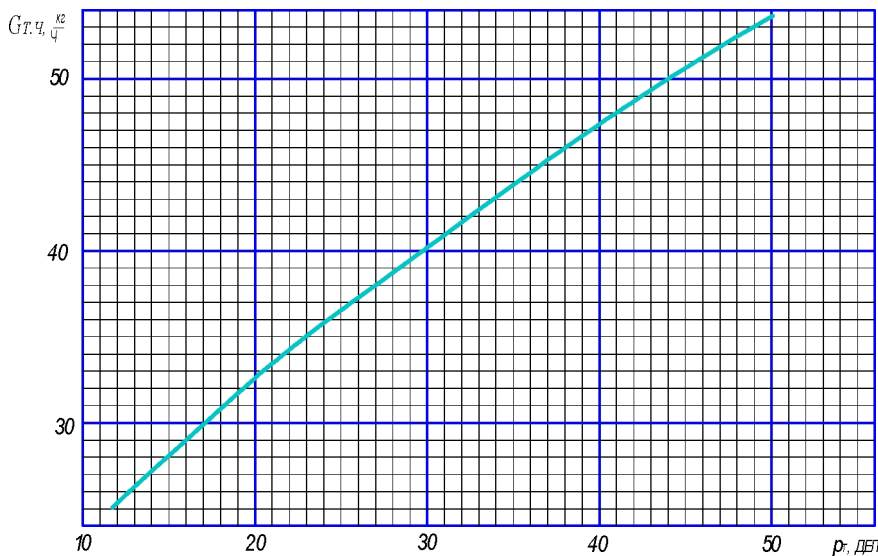


Рис. 1.2 Градуировочная зависимость для определения расхода топлива

Построение линии совместной работы и дроссельной характеристики

В данной лабораторной работе необходимо построить график линии совместной работы. Для этого используются полученные экспериментальные значения степени повышения давления в компрессоре π_K^* и приведенного расхода воздуха $G_{B,ПР}$.

Необходимо также построить зависимости тяги $P_{ПР}$, удельного расхода топлива $C_{уд,ПР}$, температуры газа за турбиной $T_{Т,ПР}^*$, расхода воздуха $G_{B,ПР}$, часового расхода топлива $G_{т.ч.,ПР}$ в функции от частоты вращения ротора двигателя $n_{ПР}$.

Графики строятся на миллиметровке, формат 210×297, простым карандашом, при помощи линейки и лекал.

Анализ результатов испытания.

Основные выводы

В заключение необходимо проанализировать результаты испытания и сделать выводы из проделанной работы, касающиеся совместной работы узлов и дроссельной характеристики одновального ТРД. При этом используются данные, полученные при изучении курса лекций по теории ВРД (11 и 12 главы из учебника [1]).

Анализ результатов испытания и основные выводы являются центральным местом работы. Этот раздел студент выполняет самостоятельно, в произвольной форме, достаточно тщательно излагает на четвертой странице протокола.

Сдача лабораторной работы

Выполненная и оформленная работа сдается преподавателю. Образец оформления протокола лабораторной работы прилагается. В процессе сдачи преподаватель задает 2-3 вопроса по методам обработки результатов измерений, по подобным режимам и формулам приведения, по совместной работе узлов и характеру протекания параметров в зависимости от частоты вращения ротора.

Если студент не сдал работу, то лабораторная работа подлежит передаче после изучения соответствующих разделов курса.

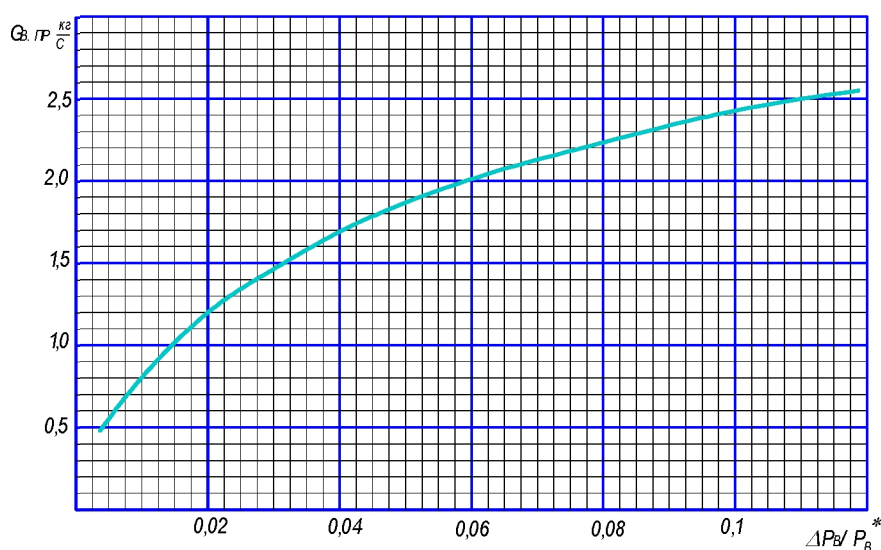


Рис. 1.3 Зависимость для определения приведенного расхода воздуха

Лабораторная работа № 2

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЗЛОВ ОДНОВАЛЬНОГО ТРД С РЕГУЛИРУЕМЫМ СОПЛОМ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Цели и особенности лабораторной работы

1. Закрепление и углубление теоретических знаний, полученных при изучении совместной работы узлов выполненного одновального ТРД с регулируемым соплом и его характеристик (глава 13 учебника [1]).
2. Закрепление навыков самостоятельной обработки результатов эксперимента, построение линий совместной работы и дроссельной характеристики ТРД.
3. Особенностью данной лабораторной работы является то, что по форме она является повторением предыдущей работы, но двигатель испытывается с другой площадью выходного сечения сопла. Однако главная цель этой работы заключается в том, чтобы, используя результаты, полученные в обеих работах,

проанализировать совместную работу узлов выполненного одновального ТРД с переменной площадью выходного сечения сопла и его характеристики.

Порядок проведения лабораторной работы

1. Проверка готовности студентов к выполнению лабораторной работы. При домашней подготовке к лабораторной работе рекомендуется пользоваться учебником [1].
2. Повторный краткий инструктаж по технике безопасности.
3. Распределение по рабочим местам.
4. Проведение испытания ТРД ТС-12 с измерением основных параметров.
5. Обработка результатов испытания, оформление протокола, построение графиков.
6. Письменный анализ результатов испытания и сдача лабораторной работы преподавателю.

Краткие замечания по двигателю

Краткое знакомство с устройством и основными техническими данными турбореактивного двигателя ТС-12 проведено при выполнении предыдущей лабораторной работы.

Испытание двигателя, измерение основных параметров

Как и при выполнении предыдущей лабораторной работы, испытание двигателя ТС-12 производится в боксе учебной лаборатории. Перед испытанием на двигателе монтируется другое сопло с величиной площади выходного сечения, равной $F_C=0,0164 \text{ м}^2$, в предыдущей работе площадь $F_C=0,0144 \text{ м}^2$.

Рабочими местами при проведении испытания двигателя являются:

- пульт управления;
- пьезометрический щит;
- щит для измерения температур.

После запуска двигателя и его выдержки для прогрева по общему сигналу производят замеры на установившихся режимах работы двигателя. О выполнении измерения сигнализируется на пульт управления при помощи включения сигнальной лампы тумблером, расположенным на рабочем месте.

Схема препарирования двигателя ТС-12 и измерение параметров не отличаются от схемы препарирования и измерения параметров в предыдущей лабораторной работе (рис. 1.1.)

Обработка результатов измерений

Порядок проведения первичной и вторичной обработки результатов сохраняется, как и в предыдущей работе.

1. Пульт управления

Тяга двигателя (в Н) определяется по формуле

$$P=P' \cdot 9,81, \text{ где } P' - \text{ тяга в кгс.}$$

Частота вращения ротора измеряется непосредственно в об/мин.

Полученные значения частоты вращения и тяги приводятся к САУ, что и является вторичной обработкой.

Часовой расход топлива определяется по давлению топлива перед форсунками с помощью градуировочной зависимости, представленной на рис. 1.2 предыдущей лабораторной работы.

Вторичная обработка результатов измерения расхода топлива заключается в вычислении удельного расхода топлива (в кг/Нч)

$$C_{уд} = G_{т.ч} / P,$$

а также в приведении значений часового и удельного расходов топлива к САУ.

2. Щит измерения температур

Первичная обработка - осреднение и определение значений температур перед компрессором и за турбиной в градусах Кельвина:

$$T_B^* = t_B^* + 273;$$

$$T_T^* = \frac{t_{T1}^* + t_{T2}^* + t_{T3}^*}{3} + 273.$$

Вторичная обработка - приведение полученных абсолютных температур к САУ.

3. Щ и т измерения давления

Первичная обработка - определение абсолютного значения давления за компрессором по формуле

$$p_K^* = p_H + \Delta p_K^*,$$

где p_H - атмосферное давление в соответствующей размерности. Значения давлений должны быть пересчитаны в Па. Для этого используются следующие соотношения:

1 кгс/см² = 0,981 · 10⁵ Па;

1 мм вод.ст = 9,81 Па;

1мм рт.ст. = 133,36 Па.

Полученные после обработки результаты измерений давлений и температуры дают возможность провести вторичную обработку и вычислить следующие параметры.

а) Степень повышения давления в компрессоре

$$\pi_K^* = \frac{p_K^*}{p_B^*}.$$

Так как потери полного давления на входе в двигатель незначительны, то принимается $p_B^* = p_H$.

б) Расход воздуха через двигатель.

Вычисляется отношение $\frac{\Delta p_B}{p_B^*}$, по величине которого с помощью зависимости, представленной на рис. 1.3, (предыдущая лабораторная работа) определяется приведенный расход воздуха $G_{В.ПР}$.

Построение линии совместной работы и дроссельной характеристики при различных значениях площади сопла F_C

По обработанным результатам, полученным при двух испытаниях двигателя с выходными соплами, имеющими разное значение площади выходного сечения, необходимо построить две линии совместной работы.

На графике дроссельной характеристики строятся зависимости тяги $P_{ПР}$, удельного расхода топлива $C_{уд.ПР}$, температуры газа за турбиной $T_{Т.ПР}^*$, расхода воздуха $G_{В.ПР}$, часового расхода топлива $G_{Т.Ч.ПР}$ в функции от частоты вращения ротора $n_{ПР}$, полученные в результате данной и предыдущей лабораторных работ.

Анализ результатов испытания.

Основные выводы

В заключение необходимо проанализировать результаты испытания и сделать выводы из проделанной работы, касающиеся влияния площади сопла на совместную работу узлов и дроссельную характеристику одновального ТРД. При этом используются знания, полученные при изучении курса лекций по теории ВРД (глава 13 учебника [1]).

Анализ результатов испытания и основные выводы являются центральным местом работы. Этот раздел студент выполняет самостоятельно, в произвольной форме и достаточно тщательно.

Сдача лабораторной работы

Выполненная и оформленная работа сдается преподавателю. Образец оформления протокола лабораторной работы прилагается. В процессе сдачи преподаватель задает 2-3 вопроса по совместной работе узлов одновального ТВД с переменной площадью выходного сечения сопла и влиянию площади сечения на характеристики ТВД. Если студент не сдал работу, то лабораторная работа подлежит передаче после изучения соответствующих разделов курса.

Лабораторная работа №3

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЗЛОВ ОДНОВАЛЬНОГО ТВД И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Цели лабораторной работы

1. Закрепление и углубление теоретических знаний, полученных при изучении совместной работы узлов выполненного ТВД и его характеристик (глава 14 учебника [1]).
2. Построение линий совместной работы и нагрузочной характеристики ТВД.
3. Получение навыков самостоятельного анализа результатов экспериментальных исследований ТВД.

Порядок проведения лабораторной работы

1. Проверка готовности студентов к выполнению лабораторной работы. При подготовке к лабораторной работе рекомендуется пользоваться учебником [1].
2. Краткий инструктаж по технике безопасности при испытании ТВД ДГ-4М на учебном стенде СГАУ.
3. Знакомство с объектом исследования - ТВД ДГ-4М. Распределение по рабочим местам.
4. Проведение испытания двигателя с измерением основных параметров.
5. Обработка результатов испытания, оформление протокола, построение графиков.
6. Письменный анализ результатов испытания и сдача лабораторной работы преподавателю.

Краткое описание двигателя

Двигатель ДГ-4М, применяемый в учебной лаборатории, выполнен на базе вспомогательной силовой установки с мощностью 40 кВт (70 л.с.).

Основные параметры двигателя:

$$\text{расход воздуха } G_B = 1,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

$$\text{степень повышения давления } \pi_K^* = 2,5;$$

$$\text{температура газов перед турбиной } T_T^* = 900\text{К};$$

$$\text{удельный расход топлива } C_e = 0,84 \frac{\text{кг}}{\text{л.с.} \cdot \text{Ч}} = 1,14 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{Ч}}.$$

Двигатель ДГ-4М имеет одновальную конструкцию с центробежным компрессором и радиально-осевой турбиной. Частота вращения ротора турбокомпрессора на эксплуатационных режимах:

$$n_{max} = 27750 \text{ об/мин} = 463 \text{ с}^{-1} (\bar{n} = 1,0).$$

В одноступенчатом редукторе частота вращения понижается до 6000 об/мин = 100 с⁻¹.

Двигатель связан с электрическим генератором С-75, мощность от которого передается на реостат сопротивления.

Установка оборудована системой плавной регулировки мощности двигателя.

На двигателе установлено жесткое сужающееся сопло.

Общий вид установки для испытания приведен на рис. 3.1.

Двигатель ДГ-4М относится к классу малоразмерных, и его параметры существенно ниже параметров современных авиационных ТВД, служащих силовыми установками самолетов и вертолетов.

Испытание двигателя.

Измерение основных параметров

Двигатель ДГ-4М снабжен необходимым препарированием. Принципиальная схема двигателя с препарированием изображена на рис. 3.2.

Рабочими местами при испытании являются следующие: пульт управления, щит измерения температур, щит измерения давления, пьезометрический щит.

Пульт управления. Здесь производятся измерения:

частоты вращения; давления топлива; электрической мощности генератора С-75.

Щит температур и давлений. Измеряются: температура газов за турбиной T_T^* ; давление за компрессором p_K^* .

Пьезометрический щит. Измеряется перепад между полным и статическим давлением в сечении на входе в компрессор $\Delta p = p_B^* - p_B \approx p_H - p_B$.

В соответствии с распределением по рабочим местам студенты участвуют в испытании и производят обработку полученных результатов.

На заключительной стадии работы производится обмен основными результатами полученных измерений, которые необходимы для построения графиков.

В процессе испытания двигателя необходимо снять характеристики при двух различных углах установки реостата загрузки генератора (что соответствует двум различным углам установки воздушного винта). Каждая дроссельная характеристика определяется для 4 значений частоты вращения: 1,0; 0,95; 0,9 и $0,8\bar{7}$.

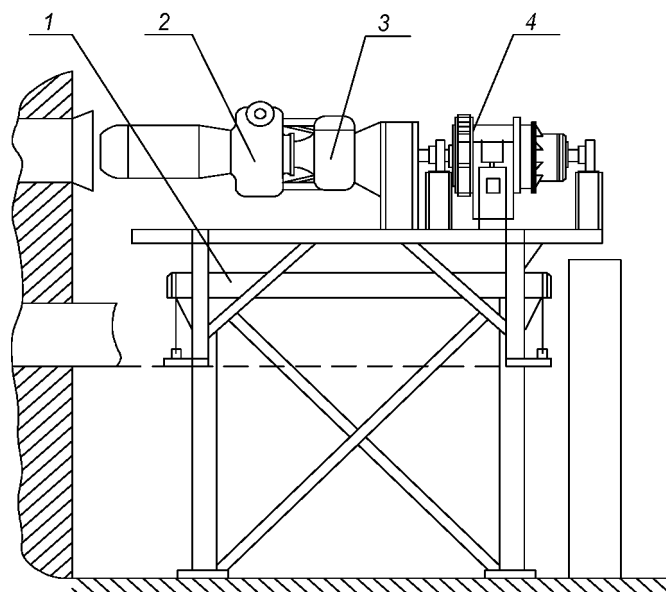


Рис.3.1. Схема установки для испытания ДГ-4М:

- 1 - испытательный станок;
- 2 - турбовальный ГТД ДГ-4М;
- 3 - редуктор двигателя;
- 4 - генератор С-75

Обработка результатов измерений

Как и в предыдущих работах, различают первичную и вторичную обработку результатов испытания. Рассмотрим порядок проведения первичной обработки для различных рабочих мест.

Пульт управления. Здесь измеряются:

- а) частота вращения \bar{n} ;
 б) давление топлива p_T , данное измерение необходимо для определения расхода топлива G_T по градуировочному графику $G_{T,ч}=f(p_T)$,

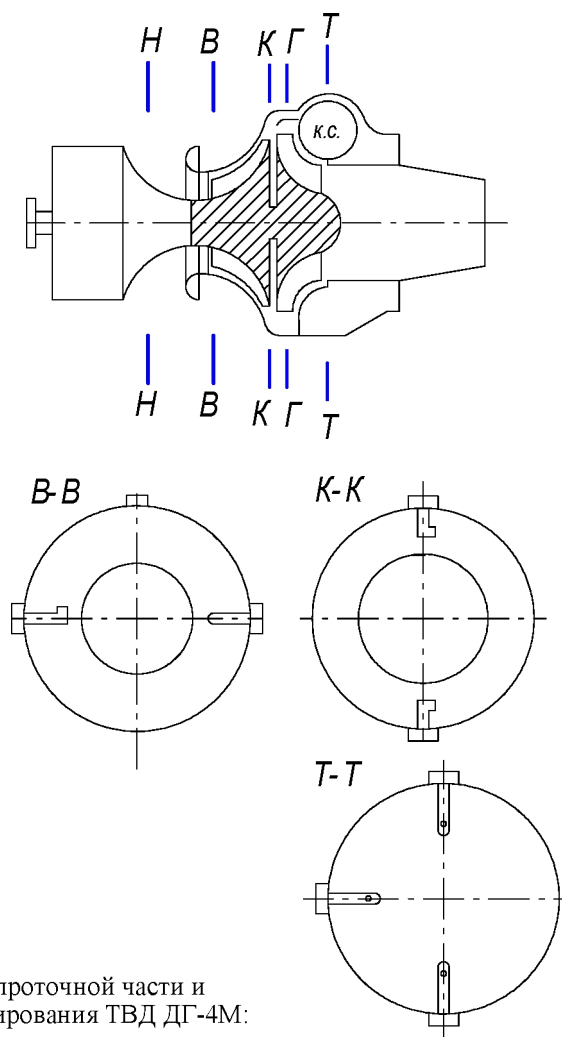






Рис.3.2. Схемы проточной части и приготовления ТВД ДГ-4М:

-  Приемник статического давления;
-  Приемник полного давления;
-  Термопара сопротивления;
-  Термопара

представленному на рис. 3.3;

- в) мощность N_e , измеряется ваттметром по электрическим параметрам генератора С-75 и определяется (в кВт) по формуле

$$N_e = 0,7355 \frac{W}{\eta_T},$$

где W – мощность генератора, дел. ваттметра;

η_T – КПД генератора ($\eta_T=0,9$).

Щит температур и давлений. Измеряются:

- а) температура газов за турбиной T_T^* ; измеренные три значения температуры осредняют и производят перевод из °С в К:

$$T_T^* = \frac{t_{T_1}^* + t_{T_2}^* + t_{T_3}^*}{3} + 273;$$

б) давление за компрессором p_K^* ; измеренное по манометру в делениях шкалы Z избыточное давление Δp_2^* переводят в Па:

$$\Delta p_K^* = Z \cdot 3,93 \cdot 10^3.$$

Абсолютное давление $p_K^* = p_H + \Delta p_K^*$;

Где $p_H = B_0 \cdot 133,332$ в Па (B_0 – барометрическое давление в мм. рт. ст.). Степень повышения давления в компрессоре $\pi_K^* = \frac{p_K^*}{p_B^*}$, где $p_B^* = p_H$.

Пьезометрический щит. Измеряется перепад между полным и статическим давлением в сечении на входе в двигатель Δp_B^* . Измеренный перепад переводят из мм. вод. ст. в Па, пользуясь соотношением 1 мм вод. ст. = 9.81 Па. Определяют отношение $\frac{\Delta p_B^*}{p_B^*}$, по величине которого с помощью графика

$G_{B,IP} = f\left(\frac{\Delta p_B^*}{p_B^*}\right)$, представленного на рис. 3.4, определяют приведенный расход воздуха.

Вторичная обработка результатов измерений заключается в приведении параметров к САУ.

Измеренные параметры и результаты их первичной и вторичной обработки должны быть представлены в протоколе лабораторной работы. Образец оформления лабораторной работы прилагается.

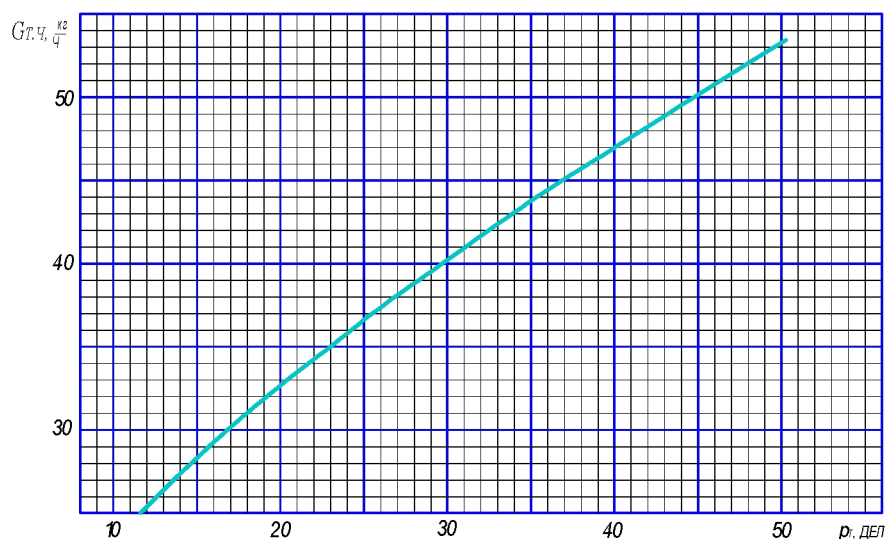


Рис. 3.3 Градуировочная зависимость для определения расхода топлива

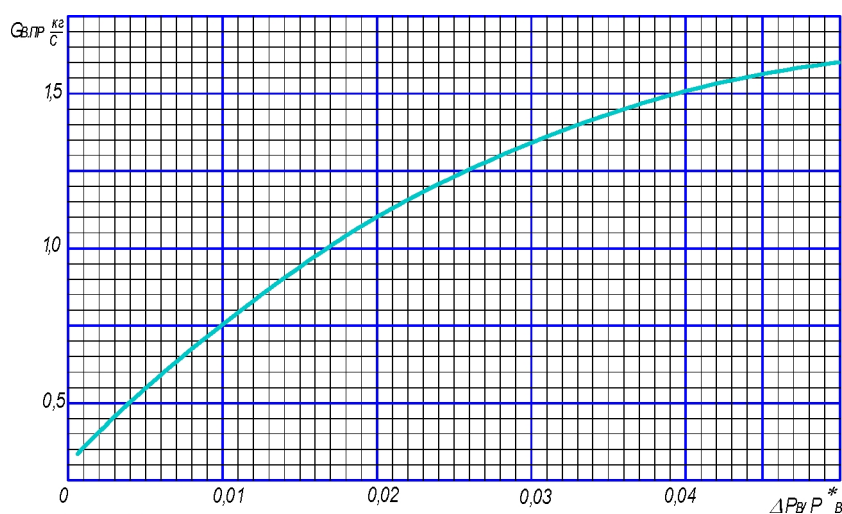


Рис. 3.4 График для определения приведенного расхода воздуха

Построение линии совместной работы и обобщенных характеристик ТВД

На графике обобщенных характеристик строятся приведенные к САУ зависимости мощности $N_{e,TP}$, часового расхода топлива $G_{т,TP}$, температуры газа за турбиной $T_{т,TP}^*$, расхода воздуха $G_{в,TP}$ и степени повышения давления в компрессоре π_K^* в функции относительной частоты вращения ротора двигателя \bar{n}_{TP} .

Линии совместной работы строятся на основе полученных из эксперимента значений π_K^* и $G_{в,TP}$.

Графики строятся на миллиметровке, формат 210×297 , простым карандашом, с помощью линейки и лекал.

Анализ результатов испытания.

Основные выводы

Используя знания, полученные при изучении курса лекций по теории ВРД, необходимо самостоятельно проанализировать результаты испытания и сделать выводы из проделанной работы. Анализ результатов и формулировка основных выводов являются центральным местом лабораторной работы. Этот раздел выполняется в произвольной форме и достаточно тщательно. Целесообразно особенности совместной работы узлов одновалного ТВД сравнить с особенностями совместной работы узлов двигателей других типов и схем, в частности, с особенностями ТРД с регулируемым соплом.

Сдача лабораторной работы

В заключение необходимо выполненную и оформленную работу сдать преподавателю. Во время сдачи преподаватель задает 2-3 вопроса по методам обработки результатов измерений, основным особенностям ТВД, совместной работе узлов, характеру протекания параметров и др. Если студент не сдал работу, то лабораторная работа подлежит передаче после изучения соответствующих разделов курса.

Лабораторная работа №4

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЗЛОВ ДВУХВАЛЬНОГО ТРДД И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Цели лабораторной работы

1. Закрепление и углубление теоретических знаний, полученных при изучении совместной работы узлов выполненного ТРДД с нерегулируемыми проходными сечениями и его характеристик (главы 10, 11, 12 учебника [1]).
2. Практическое знакомство с выполнением работ, проводимых при определении дроссельной характеристики ТРДД с автоматизацией измерения параметров и обработки результатов испытаний.
3. Развитие навыков самостоятельного анализа результатов экспериментальных исследований ТРДД.

Порядок проведения лабораторной работы

1. Проверка готовности студентов к выполнению лабораторной работы. При подготовке к лабораторной работе рекомендуется пользоваться учебником [1].
2. Ознакомление с правилами по технике безопасности при испытании ТРДД АИ-25 на учебном стенде СГАУ.
3. Знакомство с объектом исследования - ТРДД АИ-25 и оборудованием для автоматизации измерения параметров и обработки результатов испытания.
4. Проведение испытания двигателя для определения дроссельной характеристики и получение на ЭВМ протокола результатов испытания.
5. Вычисление величин, требуемых для анализа совместной работы узлов ТРДД, построение графиков.
6. Письменный анализ результатов испытания и сдача лабораторной работы.

Краткое описание двигателя АИ-25

Двухвальный ТРДД АИ-25 устанавливается на пассажирском самолете ЯК-40. Схема двигателя приведена на рис.4.1.

Его основными элементами являются: осевой дозвуковой трехступенчатый компрессор низкого давления (вентилятор); разделительный корпус, на котором размещены узлы передней силовой подвески двигателя и агрегаты систем: масляной, топливной и запуска; осевой восьмиступенчатый компрессор высокого давления; кольцевая камера сгорания с двенадцатью одноступенчатыми форсунками; одноступенчатая турбина, высокого давления; двухступенчатая турбина низкого давления; корпус задней опоры валов с узлами задней поддерживающей подвески двигателя; нерегулируемые суживающиеся реактивные сопла наружного и внутреннего контуров.

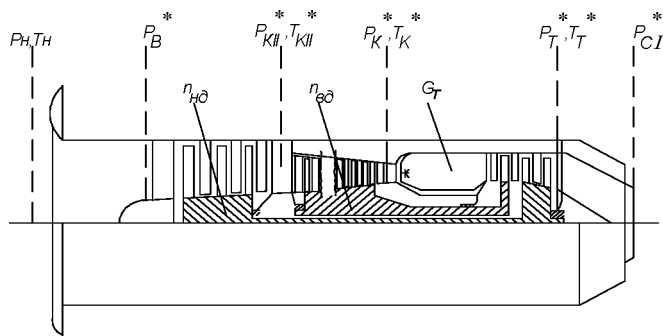


Рис. 4.1. Схема проточной части и препарирования ТРДД АИ-25

Основные технические данные двигателя в САУ
при $H=0$, $M_{п}=0$

Взлетный режим:

$$\begin{aligned}
 P &= 14,7 \text{ кН}, & C_{\text{вд}} &= 58 \text{ кг/кНч}, \\
 n_{\text{нд}} &= 10750 \text{ об/мин (90,8\%)}, & n_{\text{вд}} &= 16640 \text{ об/мин}, \\
 T_{\text{Г}}^* &= 1150 \text{ К}, & T_{\text{Т}}^* &= 827 \text{ К}, \\
 G_{\text{В}\Sigma} &= 44,25 \text{ кг/с}, & G_{\text{В}I} &= 14,75 \text{ кг/с}, \\
 \pi_{\text{В}}^* &= 1,75, & \pi_{\text{К}\Sigma}^* &= 8.
 \end{aligned}$$

Время непрерывной работы – 5 мин.

Максимальный продолжительный:

$$\begin{aligned}
 P &= 11 \text{ кН}, & C_{\text{вд}} &= 58 \text{ кг/кНч}, \\
 n_{\text{нд}} &= 9560 \text{ об/мин (80,6\%)}, & n_{\text{вд}} &= 15675 \text{ об/мин}, \\
 T_{\text{Г}}^* &= 1040 \text{ К}, & T_{\text{Т}}^* &= 763 \text{ К},
 \end{aligned}$$

Время непрерывной работы не ограничивается.

Малый газ:

$$n_{\text{вд}} = 8745 \text{ об/мин (52,5\%)}$$

Время непрерывной работы – 30 мин.

Масса двигателя – 350 кг.

Межремонтный ресурс – 3000 час.

Время суммарной наработки за ресурс не более:

на взлетном режиме – 5%;

на номинальном режиме – 40%;

на крейсерских режимах – без ограничения.

Сорт топлива.....Т-1 или ТС-1.

Сорт масла..... МК – 8.

Испытание двигателя. измерение параметров
и обработка результатов измерений

Испытание двигателя производится в боксе учебной лаборатории. Двигатель установлен на испытательном станке. К нему подведены системы питания и измерений. Воздух поступает в двигатель через лемнискатный насадок, установленный на входе. Продукты сгорания выводятся в атмосферу через башню шумоглушения. При определении дроссельной характеристики ТРДД АИ-25 в данной лабораторной работе параметры двигателя определяются на четырех режимах:

- 1) малый газ ($n_{\text{вд}} = 52,5\%$),

- 2) 0,6 номинала ($n_{ВД} = 85,1\%$),
- 3) 0,8 номинала ($n_{ВД} = 90,0\%$),
- 4) номинал ($n_{ВД} = 94,2\%$).

Измерения параметров и обработка их результатов при испытании двигателя производятся с помощью автоматизированной системы, состоящей из следующих основных элементов (рис.4.2): датчики; преобразователи и усилители; аналого-цифровой преобразователь; коммутатор; ЭВМ.

Автоматизированная система измерения позволяет определять следующие параметры двигателя:

давление и температуру воздуха в испытательном боксе p_H, T_H ,

перепад между заторможенным и статическим давлением на входе в двигатель Δp_B ;

заторможенные давления и температуры воздуха за вентилятором $p_{КII}^*, T_{КII}^*$ и за компрессором высокого давления p_K^*, T_K^* ;

заторможенное давление и температуру газа за турбиной p_T^*, T_T^* ;

заторможенное давление на срезе сопла внутреннего контура $p_{СИ}^*$;

частоты вращения роторов низкого и высокого давлений $n_{НД}$ и $n_{ВД}$;

расход топлива в секунду G_T ;

тягу двигателя P .

Схема препарирования двигателя АИ-25 приведена на рис. 4.1.

По значениям указанных параметров на ЭВМ рассчитываются следующие величины.

1. Расход воздуха через двигатель

$$G_{B\Sigma} = \frac{0,0405 \sigma_{ВХ} F_B p_H q(\lambda_B)}{\sqrt{T_H}},$$

где F_B – площадь сечения лемнискатного насадка ($F_B = 0,225 \text{ м}^2$);

$\sigma_{ВХ}$ – коэффициент восстановления полного давления в лемнискатном насадке ($\sigma_{ВХ} = 0,995$);

p_H – атмосферное давление;

T_H – температура воздуха в испытательном боксе;

$q(\lambda_B)$ – газодинамическая функция. Её значение определяется с помощью таблиц газодинамических функций

$$\text{для воздуха по величине } \pi(\lambda_B) = \frac{P_B}{\sigma_{ВХ} P_H} \dots$$

2. Расход воздуха через второй контур

$$G_{ВII} = \frac{0,0405 \mu_{СИ} F_{СИ} p_{СИ}^* q(\lambda_{СИ})}{\sqrt{T_{КII}^*}},$$

где $F_{СИ}$ – площадь выходного сечения реактивного сопла

второго контура ($F_{СИ} = 0,0904 \text{ м}^2$);

$\mu_{СИ}$ – коэффициент расхода сопла второго контура ($\mu_{СИ} = 0,985$);

$q(\lambda_{СИ})$ – газодинамическая функция. Её значение определяется с помощью таблиц газодинамических

функций для воздуха по величине $\pi(\lambda_{СИ}) = \frac{P_{СИ}}{P_{СИ}^*}$.

3. Рассчитываются:

расход воздуха через первый контур $G_{ВI} = G_{B\Sigma} - G_{ВII}$;

степень двухконтурности m ;

степень повышения давления в вентиляторе π_B^* ;

степень повышения давления в компрессоре высокого давления $\pi_{КВД}^*$;

скольжение роторов $n_{ВД} / n_{НД}$;

удельный расход топлива $C_{уд}$
и некоторые другие параметры.

Далее основные параметры двигателя приводятся к САУ.

После проведения эксперимента и обработки результатов измерений на печатающем устройстве ЭВМ получают протокол испытания.

Для анализа закономерностей расположения линий совместной работы на характеристиках компрессоров низкого давления (вентилятора) и высокого давления необходимо рассчитать на каждом режиме величины:

$$\bar{\pi}_{КНД}^* = \frac{\pi_{КНД}^*}{\pi_{КНД \text{ ном}}^*}, \quad \bar{\pi}_{КВД}^* = \frac{\pi_{КВД}^*}{\pi_{КВД \text{ ном}}^*}, \quad \bar{G}_{В \Sigma ПР} = \frac{G_{В \Sigma ПР}}{G_{В \Sigma ПР \text{ ном}}}, \quad \bar{G}_{ВІ \text{ ПР.ВВД}} = \frac{G_{ВІ \text{ ПР.ВВД}}}{G_{ВІ \text{ ПР.ВВД \text{ ном}}}},$$

где параметры с индексом "ном" соответствуют параметрам, определенным при $n_{ВД} = 94.2\%$.

Построение линий совместной работы и дроссельной характеристики

В данной лабораторной работе необходимо построить линии совместной работы узлов на характеристиках компрессоров низкого и высокого давления. Эти линии совместной работы строятся в относительных координатах $\bar{\pi}_K^* = f(\bar{G}_{В.ПР})$, на одном рисунке, в едином масштабе так, чтобы обе кривые пересекались в одной точке с координатами $\bar{\pi}_K^* = 1, \bar{G}_{В.ПР} = 1$.

На графике дроссельной характеристики строятся зависимости тяги $P_{ПР}$, удельного расхода топлива $C_{уд.ПР}$, суммарного расхода воздуха $G_{В.ПР}$, степени двухконтурности m , скольжения роторов $n_{ВД} / n_{НД}$ от частоты вращения каскада высокого давления $n_{ВД.ПР}$. Графики отруются на миллиметровой бумаге формата 210×297 простым карандашом. Экспериментальные точки выделяются условными значками.

Анализ результатов испытания и основные выводы

В заключение необходимо проанализировать и объяснить результаты, полученные при испытании двигателя, а также сделать выводы из проделанной работы, касающиеся совместной работы узлов и дроссельной характеристики двухвального ТРДД. При этом используются данные, полученные при изучении, курса теории ВРД (главы 10, 11 и 12 учебника [1]). Особое внимание необходимо уделить анализу изменения степени двухконтурности m и скольжения роторов $n_{ВД} / n_{НД}$ на дроссельной характеристике, а также анализу особенностей расположения линий совместной работы на характеристиках компрессоров низкого и высокого давлений.

В выводах должны быть описаны основные закономерности совместной работы узлов и дроссельной характеристики ТРДД, полученные при выполнении данной лабораторной работы.

Анализ результатов испытания и основные выводы являются центральным местом работы. Этот раздел студенты выполняют самостоятельно, в произвольной форме, достаточно тщательно и излагают в обороте протокола испытания.

Сдача лабораторной работы

В заключение необходимо выполненную и оформленную работу сдать преподавателю. Во время сдачи студент отвечает на 2-3 вопроса по материалам данной лабораторной работы. Если студент не сдал работу, то лабораторная работа подлежит передаче после изучения соответствующих разделов курса.

Литература

1. Кулагин В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Учебник – М.: Машиностроение, 2002г. – 616с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Таблица перевода единиц измерения некоторых физических величин в систему СИ

Наименование и обозначение величин	Единица		Значение в единицах СИ и кратных им
	Наименование	Обозначение	
Масса	Килограмм-сила-секунда в квадрате на метр	кгс·с ² /м	9,81 кг
Сила, вес, тяга P	Килограмм-сила	кгс	9,81 Н
Давление p	Килограмм-сила на квадратный метр	кгс/м ²	9,81 Па
Удельная тяга $P_{уд}$	Килограмм-сила-секунда на килограмм	кгс·с/кг	9,81 Н·с/кг
Удельный расход топлива $C_{уд}$, отнесенный к единице тяги	Килограмм в час на килограмм-силу	кг/(ч·кгс)	10,2 кг/(чН)
Мощность N	Лошадиная сила	Л.с.	735,5 Вт=0,7355кВт
Удельный расход топлива C_e , отнесенный к единице работы	Килограмм на лошадиную силу-час	кг/л.с.ч	$\frac{1}{735,5 \cdot 3600}$ кг/Дж= $= \frac{1}{0,7355}$ кг/(кВт·ч)
Удельная работа компрессора L_K или турбины L_T , теплотворность топлива H_U , удельное количество теплоты Q , удельная энтальпия i	Килокалория на килограмм	ккал/кг	$4,187 \cdot 10^3$ Дж/кг
	Килограмм-сила-метр на килограмм	кгс·м/кг	9,81 Дж/кг
Удельная теплоемкость c_p , удельная газовая постоянная R , удельная энтропия S	Килокалория на килограмм-градус Цельсия	ккал/(кг·°C)	$4,187 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)
	Килограмм-сила-метр на килограмм-градус Цельсия	кгс·м/(кг·°C)	9,81 Дж/(кг·К)
Массовый расход воздуха G_B , газа G_T , топлива G_T	Килограмм в час	кг/ч	$0,2778 \cdot 10^3$ кг/с
Плотность ρ	Килограмм-сила-секунда в квадрате на метр в четвертой степени	кгс·с ² /м ⁴	9,81кг/м ³

2. Бланк задания к лабораторной работе №1

Министерство образования Российской Федерации.

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королева

РАБОТА № 1

Задание. По результатам эксперимента построить линию совместной работы, дроссельную характеристику и проанализировать их.

По результатам эксперимента построить графики: $P_{пр}$, $C_{уд,пр}$, $G_{в,пр}$, $T_{т,пр}^*$, $G_{т,ч,пр}=f(n_{пр})$, $\pi_K^* = f(G_{в,пр})$.

Краткая методика эксперимента. В процессе эксперимента измеряются следующие параметры: n , P , Δp_{BX} , G_T , T_{BX}^* , T_T^* , G_B и другие. Измерение производят на заданных режимах работы двигателя (не менее 4)

В результате первичной и вторичной обработки результатов измерений получаем осредненные и приведенные к САУ параметры, по которым строим линию совместной работы и дроссельную характеристику.

Экспериментальная установка и ее данные. ТРД на базе стартера ТС-12, с лемнискатным насадком $F_{BX} = 0,0165 \text{ м}^2$ и соплом $F_c = 0,0144 \text{ м}^2$. Измерительные приборы: силоизмерительный станок, весовая головка РП-100Ц-13, тахометр, пьезомертрический щит и щит измерения температур и давлений.

3. Протокол № 1 к лабораторной работе № 1.

«8» февраля 2003 г. Протокол № 1 Топливо ТС-1, $\rho = 0,78 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
 ПРИНЯТО _____ Атмосферные условия $p_H = 751 \text{ мм рт. ст.}$ t_H _____ °C масло МК-8

Подпись преподавателя _____

№ реж.	Пульт			Щит температур				Пьезометры	Манометры
	n	P'	p_T	$t_B = t_H$	$t_{T_1}^*$	$t_{T_2}^*$	$t_{T_3}^*$	Δp_B	Δp_K^*
	об/мин	кгс	дел	°C	°C	°C	°C	мм вод. ст.	дел
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Результаты измерений									
1	18000	28,1	7,4	10	530	476	478	122/122	21,5

Пульт		Щит температур			Пьезометр	Манометры
P	G_T	T_B^*	$t_{T_{CP}}^*$	T_T^*	Δp_B	p_K^*
Н	кг/с	К	°C	К	Па	Па
11	12	13	14	15	16	17
Первичная обработка						
275,7	0.0138	283	495	768	2432,88	15288

n	P_{PR}	$T_{B_{PR}}^*$	$T_{T_{PR}}^*$	$G_{B_{PR}}$	π_K^*	G_m	$C_{удPR}$
об/мин	Н	К	К	кг/с		кг/ч	кг/Нч
18	19	20	21	22	23	24	26
Вторичная обработка							
18158	284	288	781,6	1,28	1,526	50,4	0,18126

4. Бланк задания к лабораторной работе № 2

Министерство образования Российской Федерации.

РАБОТА № 2

Задание. Определить влияние площади сопла на положение линии совместной работы и характеристики одновального ТРД.

По результатам эксперимента построить графики: $P_{ПР}$, $C_{уд.ПР}$, $G_{В.ПР}$, $T_{Т.ПР}^*$, $G_{Т.ч.ПР}=f(n_{ПР})$, $\pi_K^* = f(G_{В.ПР})$.

Краткая методика эксперимента. Проводим испытание двигателя и обрабатываем результаты так же, как в работе №1, но при другой площади сопла. Обработанные результаты испытания нанести на графики из работы №1. Сравнительным анализом результатов испытаний определить влияние площади сопла на положение линий совместной работы и характеристики двигателя.

Экспериментальная установка и ее данные. ТРД на базе стартера ТС-12, с лемнискатным насадком $F_v = 0,0165 \text{ м}^2$ и соплом $F_c = 0,0164 \text{ м}^2$. Измерительные приборы: силоизмерительный станок, весовая головка РП-100Ц-13, тахометр ТСФУ1-4, пьезометрический щит и щит измерения температур и давлений.

5. Протокол № 2 к лабораторной работе № 2

«22» февраля 2003 г. Протокол № 2 Топливо ТС-1, $\rho = 0,78 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
 ПРИНЯТО _____ Атмосферные условия $p_H = 770 \text{ мм рт. ст.}$ t_H _____ °C масло МК-8
 Подпись преподавателя _____

№ реж.	Пульт			Щит температур				Пьезометры	Манометры
	n	P'	P_T	$t_B = t_H$	$t_{T_1}^*$	$t_{T_2}^*$	$t_{T_3}^*$	Δp_B	Δp_K^*
	об/мин	кгс	дел	°C	°C	°C	°C	мм вод. ст.	дел
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Результаты измерений									
1	18000	27,1	7	12,5	525	490	490	120/121	21

Пульт		Щит температур			Пьезометр	Манометры
P	G_T	T_B^*	$t_{T_{CP}}^*$	T_T^*	Δp_B	P_K^*
Н	кг/с	К	°C	К	Па	Па
11	12	13	14	15	16	17
Первичная обработка						
265,8	0.013	285,5	325	775	2364	15200

n	P_{PR}	$T_{B_{PR}}^*$	$T_{T_{PR}}^*$	$G_{B_{PR}}$	π_K^*	G_T	$C_{удPR}$
об/мин	Н	К	К	кг/с		кг/ч	кг/Нч
18	19	20	21	22	23	24	26
Вторичная обработка							
18078,6	267,5	288	782	1,32	1,5	47,3	0,177

$\Delta P_{ВХ} / P_H^*$	G_T	Ne	T_T^*	P_K^*	P_H	π_K^*	$G_{В,ПР}$	T_K^*
	кг/ч	кВт	К	Па	Па		кг/с	К
11	12	13	14	15	16	17	18	19
Первичная обработка								
0,055	54	34,3	673	23380	10042	2,33	1,73	369
0,056	46	23,7	637	22990	10042	2,289	1,76	368

$G_{м ч,ПР}$	$Ne_{ПР}$	$T_{К ПР}^*$	$\bar{\eta}_{ПР}$
кг/ч	кВт	К	%
20	21	22	23
Вторичная обработка			
53,9	34,3	362,7	0,99
45,9	23,7	359,3	0,99

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. Совместная работа узлов одновального ТРД и его характеристики.....	2		
Лабораторная работа № 2. Совместная работа узлов одновального ТРД с регулируемым соплом и его характеристики.6	6		
Лабораторная работа №3. Совместная работа узлов одновального ТВД и его характеристики.....	9		
Лабораторная работа №4. Совместная работа узлов двухвального ТРДД и его характеристики.....	14		
Литература.....		Ошибка!	Закладка не
определена.			
Приложения.....	27		
1. Таблица перевода единиц измерения некоторых физических величин в систему СИ.....	27		
2. Бланк задания к лабораторной работе № 1.....	28		
3. Протокол № 1 к лабораторной работе № 1.....	29		
4. Бланк задания к лабораторной работе № 2.....	30		
5. Протокол № 2 к лабораторной работе № 2.....	31		
6. Бланк задания к лабораторной работе № 3.....	32		
7. Протокол № 3 к лабораторной работе № 3.....	33		

Составители: Сергей Константинович Бочкарев,
Владимир Алексеевич Григорьев, Виктор Владимирович Кулагин

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЗЛОВ ВРД И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Подписано в печать Формат 60×84 1/16.

Самарский Аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева