

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**Исследование влияния регулирования
площади сопла на совместную работу узлов
одновального ТРД и его характеристики с
помощью автоматизированной системы
«АСТРА»**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний*

С А М А Р А
Издательство СГАУ
2011

УДК СГАУ: 629.7.036

Составители: В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев, И.Н. Крупенич,
А.Ю. Ткаченко, В.Н. Рыбаков

Рецензент:

Исследование влияния регулирования площади сопла на совместную работу узлов одновального ТРД и его характеристики с помощью автоматизированной системы «АСТРА»: эл. метод. указания / сост. В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев, И.Н. Крупенич, А.Ю. Ткаченко, В.Н. Рыбаков.– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 16 с.: ил.

В методических указаниях изложены содержание и методика проведения лабораторной работы по курсу «Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок». Основное внимание при выполнении лабораторной работы уделяется анализу 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.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

1 Совместная работа узлов, характеристики и управление одновального ТРД с регулируемой площадью сопла.....	4
1.1 Особенности работы узлов газогенератора и обобщенные характеристики ТРД при $F_{с.кр} = var$	4
1.2 Особенности управления одновального ТРД и его характеристики на режимах пониженной тяги при $F_{с.кр} = var$	7
2 Математическое моделирование одновального ТРД с регулируемой площадью сопла с помощью автоматизированной системы «АСТРА»	10
3 Цель, задачи и порядок выполнения лабораторной работы.	11
4 Контрольные вопросы к отчету по лабораторной работе.	15
Список использованной литературы.....	16

1 СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЗЛОВ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И УПРАВЛЕНИЕ ОДНОВАЛЬНОГО ТРД С РЕГУЛИРУЕМОЙ ПЛОЩАДЬЮ СОПЛА.

1.1 Особенности работы узлов газогенератора и обобщенные характеристики ТРД при $F_{с.кр} = var$

Влияние $F_{с.кр}$ на положение линии совместной работы.
Совместная работа турбины и сопла с регулируемым минимальным сечением $F_{с.кр} = var$ рассматривалась в разд. 10.2 [1], где показано (см. рисунок 10.2 [1]), что с увеличением площади сопла возрастает степень понижения давления газа в турбине π_t^* , так как повышение пропускной способности сопла сопровождается снижением давления за турбиной. Из уравнения баланса мощности $l_k = \frac{T_g^*}{T_b^*} l_t B$ следует, что с увеличением π_t^* при $T_g^* = const$ возрастает степень повышения давления компрессора π_k^* , так как увеличенному значению работы турбины соответствует увеличенное значение работы компрессора.

Согласно условию неразрывности $q(\lambda_b) = \frac{\pi_k^*}{\sqrt{T_g^* / T_b^*}} A$ повышению π_k^* должно соответствовать увеличенное значение $q(\lambda_b)$, так как расход воздуха через минимальное сечение соплового аппарата турбины изменяется при принятом условии ($T_g^* = const$) пропорционально полному давлению $p_g^* = p_b^* \pi_k^* \sigma_{к.с}$. В результате каждая рабочая точка на характеристике компрессора смещается по линии $T_{г.пр}^* = const$ вправо вверх, что приводит к смещению линии совместной работы и увеличению запасов устойчивой работы (рисунок 1). Такое смещение линии – следствие уменьшения теплового сопротивления (снижения степени подогрева газа в камере сгорания и увеличения ее пропускной способности). Одновременно увеличивается приведенная частота вращения ротора $n_{пр}$. (Смещение линии совместной работы вниз и увеличение ΔK_y при повышении π_t^* ($F_{с.кр}$) легко установить также из уравнения (10.7) [1] при $q(\lambda_b) = const$.)

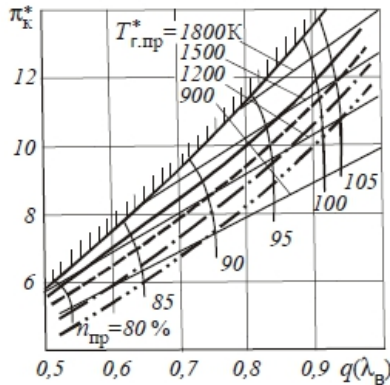


Рисунок 1 — Влияние площади сопла $F_{c,kr}$ на положение линии совместной работы на характеристике компрессора одновального ТРД:

- — — — — $F_{c,kr \text{ исх}} = 0,23 \text{ м}^2$;
- - - - - $\delta F_{c,kr} = +10 \%$;
- · - · - · $\delta F_{c,kr} = +20 \%$;
- · · · · · $\delta F_{c,kr} = +30 \%$

Подчеркнем, что в каждой точке характеристики компрессора с нанесенными линиями $T_{г.пр}^ = const$ и $F_{c,kr} = const$ могут быть легко определены не только π_k^* , $q(\lambda_B)$, $\eta_{пр}$, но также $T_{г.пр}^*$ и $F_{c,kr}$.*

Обобщенные характеристики одновального ТРД с $F_{c,kr} = var$. При $T_{г}^* = const$ с возрастанием площади $F_{c,kr}$ температура газа за турбиной одновального ТРД снижается вследствие увеличения работы L_T , степень расширения газа в канале сопла $\pi_{c,p}$ обычно повышается, так как увеличению π_T^* соответствует более значительный рост π_k^* . Удельная тяга в большинстве случаев изменяется незначительно (рисунок 2,а) в связи с тем, что влияние определяющих ее величин T_T^* и $\pi_{c,p}$ частично компенсируется.

Относительный расход топлива q_T при этом уменьшается из-за увеличения температуры воздуха за компрессором. Поэтому и удельный расход топлива с увеличением $F_{c,kr}$ обычно уменьшается, если КПД узлов изменяются незначительно.

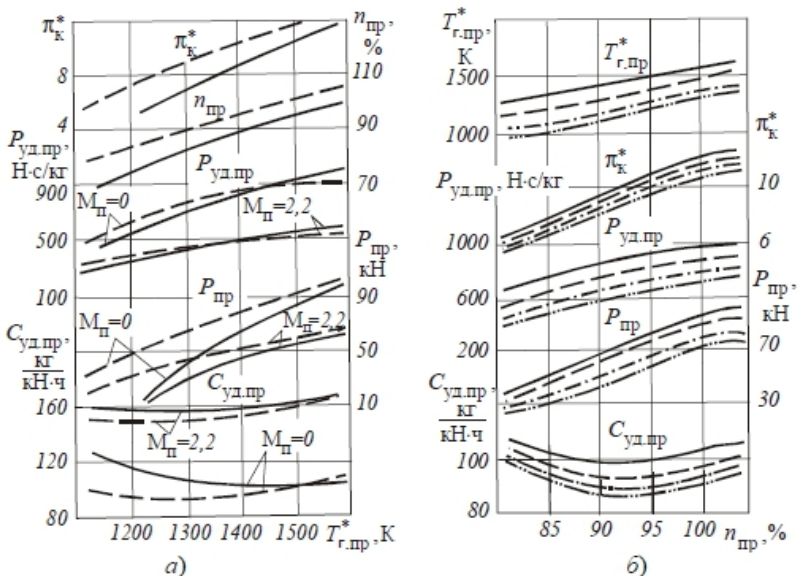


Рисунок 2 — Влияние $F_{c,kr}$ на обобщенные характеристики
одновального ТРД (обозначения см. рисунок 1):
а — $M_n = var$; б — $M_n = 0$

Изменение удельной тяги и удельного расхода топлива в большой степени определяется изменением КПД компрессора и турбины, а также коэффициента скорости сопла. С увеличением $F_{c,kr}$ КПД компрессора чаще всего снижается (особенно при высоких $n_{пр}$), при значительном увеличении $F_{c,kr}$ снижаются также КПД турбины и коэффициент потерь скорости сопла вследствие увеличения скорости газового потока на выходе из турбины. Снижение эффективности работы узлов ведет к уменьшению удельной тяги и к увеличению удельного расхода топлива.

Тяга двигателя с увеличением $F_{c,kr}$ при $T_r^ = const$ возрастает в зоне средних значений $n_{пр}$ благодаря повышению расхода воздуха. При больших $n_{пр}$ тяга уменьшается, так как величина G_v изменяется незначительно, а $P_{уд}$ уменьшается вследствие снижения η_k^* .*

Следует отметить, что характер влияния площади сопла на тягу и удельный расход топлива зависит от закона управления двигателя, точнее, от условия, при котором рассматривается это влияние. Чтобы

убедиться в этом, проведем физический анализ влияния $F_{с.кр}$ на параметры выполненного одновального ТРД, управляемого по закону $n = \text{const}$ ($G_B \approx \text{const}$). С увеличением $F_{с.кр}$ давление за турбиной снижается, мощность турбины повышается и становится больше мощности компрессора, что ведет к увеличению частоты вращения ротора. Из условия обеспечения $n = \text{const}$ регулятор уменьшает расход топлива через двигатель, что ведет к снижению температуры $T_{г}^*$, повышению пропускной способности камеры сгорания, а следовательно к снижению давления p_k^* за компрессором и соответствующему смещению рабочей точки на характеристике компрессора. Степень расширения $\pi_{с.р}$ и температура $T_{т}^*$ уменьшаются в этом случае не только за счет увеличения $\pi_{т}^*$, но и вследствие снижения π_k^* и $T_{г}^*$, соответственно. В результате ΔK_y увеличивается, а удельная и полная тяга уменьшаются. Удельный расход топлива обычно снижается главным образом вследствие уменьшения $T_{г}^*$, (рисунок 2,б).

1.2 Особенности управления одновального ТРД и его характеристики на режимах пониженной тяги при $F_{с.кр} = \text{var}$

На двигателе с $F_{с.кр} = \text{var}$ пониженную тягу можно получить при различных программах управления, например путем снижения температуры $T_{г}^*$ при $n = \text{const}$ или, наоборот, путем снижения n при $T_{г}^* = \text{const}$. Снижение температуры осуществляется за счет увеличения площади сопла при одновременном уменьшении расхода топлива, снижение n – за счет уменьшения площади сопла при одновременном уменьшении расхода топлива. Эти два способа снижения тяги – крайние случаи: первый способ характеризуется смещением рабочей точки на характеристике компрессора вниз по линии $n_{пр} = \text{const}$, что соответствует увеличению запасов устойчивости, второй – смещением рабочей точки влево вниз по линии $T_{г.пр}^* = \text{const}$, что соответствует уменьшению ΔK_y .

Таким образом, двигатель с $F_{с.кр} = \text{var}$ имеет более широкие возможности получения пониженной тяги, что позволяет выбрать программу управления на этих режимах из условия обеспечения

минимального удельного расхода топлива и обеспечения запасов устойчивой работы.

Из анализа рисунка 3 следует, что при заданной тяге на пониженном режиме минимальный удельный расход топлива получается при определенном сочетании параметров T_r^* и n , которое достигается подбором оптимальной площади $F_{с.кр}$ и расхода топлива.

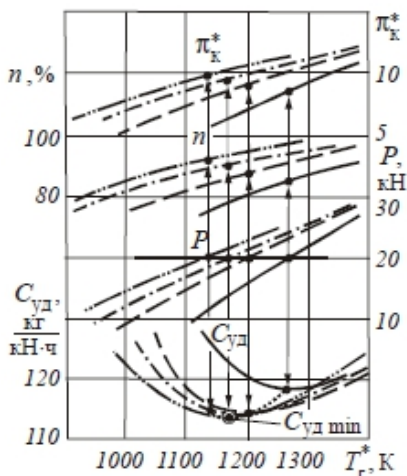


Рисунок 3 — К выбору оптимальной программы управления
одновального ТРДД ($H=11\text{км}$, $M_n=1$)
(обозначения см. рис. 1)

Оптимальные сочетания T_r^* и n , найденные из условия обеспечения минимального удельного расхода топлива на различных режимах, и соответствующие значения $F_{с.кр\text{ опт}}$ показаны на рисунке 4. Регулирование сопла позволяет в данном случае снизить удельный расход топлива на крейсерских режимах примерно на 6 %. Потребное изменение площади сопла достигает при этом 25 %.

Полученную таким образом оптимальную программу управления обычно перестраивают как зависимость частоты n и температуры T_r^* (или площади $F_{с.кр}$) от угла установки рычага управления.

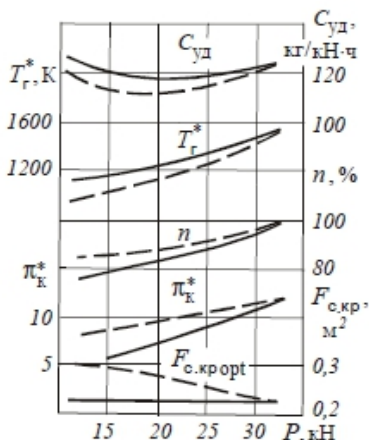


Рисунок 4 — Сравнение дроссельных характеристик
однофазного ТРД ($H=11$ км, $M_n=1$):
--- — при оптимальной программе управления;
— — при $F_{c,кр} = const$;

Оптимальные сочетания T_g^* и n , обеспечивающие $C_{уд \min}$, оказываются в общем случае неодинаковыми для различных условий полета. Программа управления выбирается, как правило, для условий длительного полета. Чтобы не усложнять систему управления, эта же программа применяется и для других условий; аналогично закон управления, выбранный для максимального режима, применяется и на других режимах. Поэтому T_g^* и n на всех основных режимах в любых условиях эксплуатации определяются по формулам

$$T_g^* = T_\alpha T_{T_n^*} T_{T_0^*}; \quad n = \bar{n}_\alpha \bar{n}_{T_n^*} n_0,$$

где $\bar{T}_\alpha = T_g^*/T_{T_0^*}$ и $\bar{n}_\alpha = n/n_0$ — соответственно относительное изменение температуры газа перед турбиной и частоты вращения ротора по углу установки рычага управления, заданное программой управления; $\bar{T}_{T_n^*}$ и $\bar{n}_{T_n^*}$ — изменение тех же величин по полной температуре на входе в двигатель, заданное законом управления.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОВАЛЬНОГО ТРД С РЕГУЛИРУЕМОЙ ПЛОЩАДЬЮ СОПЛА С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ «АСТРА»

Для того, чтобы получить данные необходимые для анализа влияния регулирования площади сопла на совместную работу узлов одновального ТРД и его характеристики, студент выполняет расчётный эксперимент с помощью виртуальной модели рабочего процесса одновального ТРД, реализованной в автоматизированной системе термодинамического расчёта и анализа АСТРА.

Исходными данными для выполнения расчётов являются:

- температура T_n^* и давление p_n^* атмосферного воздуха (задаются преподавателем);
- площадь выходного сечения сопла F_c ;
- относительная величина частоты вращения ротора \bar{n} .

Результатами расчётного эксперимента являются:

- тяга двигателя P ;
- часовой расход топлива $G_{т.ч}$;
- полная температура рабочего тела в сечении на выходе из компрессора T_k^* ;
- полная температура рабочего тела в сечении на выходе из турбины T_t^* ;
- статическое давление рабочего тела в сечении на входе в компрессор p_v ;
- полное давление рабочего тела в сечении на входе в компрессор p_v^* ;
- полное давление рабочего тела в сечении на выходе из компрессора p_k^* .

3 ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.

Цели и особенности лабораторной работы

1. Закрепление и углубление теоретических знаний, полученных при изучении совместной работы узлов выполненного однофазного ТРД с регулируемым соплом и его характеристик (глава 13 учебника [1]).

2. Закрепление навыков самостоятельной обработки результатов расчётного эксперимента, построение линий 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. Проведение расчётного эксперимента.

3. Обработка результатов расчётного эксперимента, оформление протокола, построение графиков.

4. Письменный анализ результатов расчётного эксперимента и сдача лабораторной работы преподавателю.

Проведение расчётного эксперимента

Особенностью данной лабораторной работы является то, что данные, получаемые с помощью виртуальной модели ТРД, эквивалентны результатам испытания двигателя в боксе наземного стенда.

Для исследования влияния регулирования площади сопла на совместную работу узлов однофазного ТРД и его характеристики проводятся две серии расчётов при значениях площади сопла $F_c = 0,0144 \text{ м}^2$ и $F_c = 0,0164 \text{ м}^2$. При этом каждая серия расчётов включает определение параметров на четырёх установившихся режимах двигателя, характеризующих относительными величинами частоты вращения ротора $\bar{n} = 60\%, 80\%, 90\%$ и 100% .

Обработка результатов расчётного эксперимента

В результате обработки данных для каждого из четырёх режимов работы двигателя в каждой из двух серий расчётных экспериментов должны быть определены:

- относительная плотность тока рабочего тела в сечении на входе в компрессор $q(\lambda_{\text{в}})$;
- расход воздуха через двигатель $G_{\text{в}}$;
- степень повышения давления в компрессоре $\pi_{\text{к}}^*$;
- удельный расход топлива $C_{\text{уд}}$;
- приведённое значение относительной величины частоты вращения ротора $\bar{n}_{\text{пр}}$;
- приведённое значение тяги двигателя $P_{\text{пр}}$;
- приведённое значение удельного расхода топлива $C_{\text{уд.пр}}$;
- приведённое значение часового расхода топлива $G_{\text{т.ч.пр}}$;
- приведённое значение расхода воздуха через двигатель $G_{\text{в.пр}}$;
- приведённое значение полной температуры рабочего тела в сечении на выходе из компрессора $T_{\text{к.пр}}^*$;
- приведённое значение полной температуры рабочего тела в сечении на выходе из турбины $T_{\text{т.пр}}^*$.

При обработке расчётных экспериментов принимать $F_{\text{в}} = 0,0144 \text{ м}^2$.

На основании данных, полученных в ходе обработки результатов двух серий расчётных экспериментов, заполняется таблица 1, строятся две линии совместной работы и графики приведённых дроссельных характеристик. На графиках приведённых дроссельных характеристик изображаются зависимости $P_{\text{пр}}$, $C_{\text{уд.пр}}$, $G_{\text{т.ч.пр}}$, $G_{\text{в.пр}}$, $\pi_{\text{к}}^*$, $T_{\text{к.пр}}^*$, $T_{\text{т.пр}}^*$ как функции от $\bar{n}_{\text{пр}}$ при различных значениях площади выходного сечения сопла.

Таблица 1 — Результаты расчётных экспериментов

	F_c	\bar{n}	T_H^*	p_H^*	P	$G_{т.ч}$	T_K^*	T_T^*	p_B	p_B^*	p_K^*
	M^2	%	K	$кПа$	$кН$	$\frac{кг}{ч}$	K	K	$кПа$	$кПа$	$кПа$
1	0,0144	60									
2		80									
3		90									
4		100									
5	0,0164	60									
6		80									
7		90									
8		100									

Таблица 2 — Результаты обработки расчётных экспериментов

	$\pi(\lambda_B)$	$q(\lambda_B)$	G_B	π_K^*	$C_{уд}$
			$\frac{кг}{с}$		$\frac{кг}{кН \cdot ч}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

Таблица 2 (продолжение)

	$\bar{n}_{\text{пр}}$	$P_{\text{пр}}$	$C_{\text{уд.пр}}$	$G_{\text{т.ч.пр}}$	$G_{\text{в.пр}}$	$T_{\text{к.пр}}^*$	$T_{\text{т.пр}}^*$
	%	κH	$\frac{\kappa \mathcal{E}}{\kappa H \cdot \mathcal{U}}$	$\frac{\kappa \mathcal{E}}{\mathcal{U}}$	$\frac{\kappa \mathcal{E}}{c}$	K	K
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

Анализ результатов. Основные выводы

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

Анализ результатов 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. В процессе сдачи преподаватель задает 2-3 вопроса по совместной работе узлов одновального ТРД с переменной площадью выходного сечения сопла и влиянию площади сечения на характеристики ТРД. Если студент не сдал работу, то лабораторная работа подлежит передаче после изучения соответствующих разделов курса.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ОТЧЕТУ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ.

1. Какое влияние оказывает изменение площади сопла на совместную работу узлов, положение линии совместной работы и на обобщенные характеристики одновального ТРД, построенные по температуре $T_{г.пр}^*$?

2. Проанализируйте влияние площади сопла одновального ТРД на ΔK_y и $C_{уд}$ при следующих условиях: а) $n = const$; б) $T_g^* = const$.

3. В чем преимущества одновального ТРД с $F_{с.кр} = var$ по сравнению с ТРД с нерегулируемыми сечениями?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Кулагин, В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок [Текст]: Учебник. 2-ое изд. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. (Кн. 1). Основы теории ГТД. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики (Кн. 2). М.: Машиностроение, 2003. – 615 с.: ил.