

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»**

САМАРА 2011

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. – 15 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

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

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

**Влияние  $F_{c.кр}$  на положение линии совместной работы.**  
Совместная работа турбины и сопла с регулируемым минимальным сечением  $F_{c.кр} = var$  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  $\pi_T^*$ , так как повышение пропускной способности сопла сопровождается снижением давления за турбиной. Из уравнения баланса мощности  $l_k = \frac{T_r^*}{T_b^*} l_T B$  следует, что с увеличением  $\pi_T^*$  при  $T_r^* = const$  возрастает степень повышения давления компрессора  $\pi_k^*$ , так как увеличенному значению работы турбины соответствует увеличенное значение работы компрессора.

Согласно условию неразрывности  $q(\lambda_b) = \frac{\pi_k^*}{\sqrt{T_r^*/T_b^*}} A$  повышению  $\pi_k^*$  должно соответствовать увеличенное значение  $q(\lambda_b)$ , так как расход воздуха через минимальное сечение соплового аппарата турбины изменяется при принятом условии ( $T_r^* = const$ ) пропорционально полному давлению  $p_r^* = p_b^* \pi_k^* \sigma_{к.с.}$ . 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  $\Delta K_y$  при повышении  $\pi_T^*$  ( $F_{c.кр}$ ) легко установить также из уравнения (10.7) [1] при  $q(\lambda_b) = const$ .)

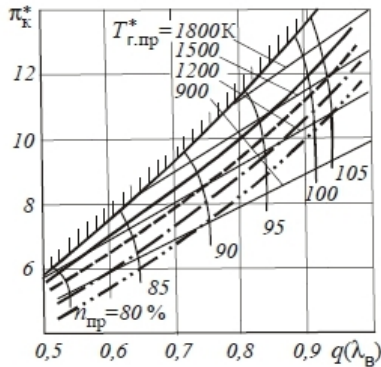


Рисунок 1 — Влияние площади сопла  $F_{c,кр}$  на положение линии совместной работы на характеристике компрессора одновального ТРД:

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

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

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

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

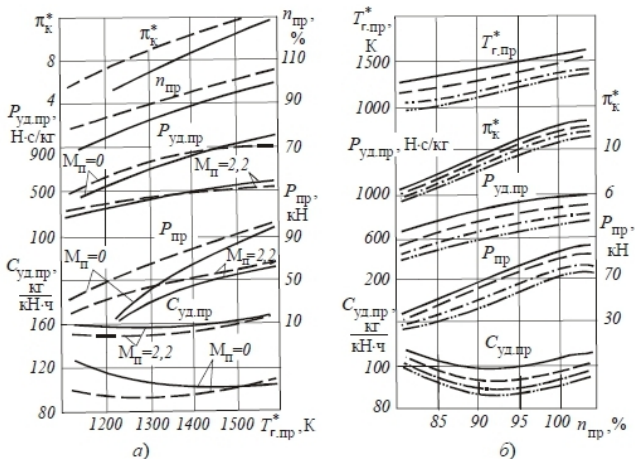


Рисунок 2 — Влияние  $F_{c,kr}$  на обобщенные характеристики одновального ТРД (обозначения см. рисунок 1):  
 а –  $M_n = var$  ; б –  $M_n = 0$

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  $\eta_k^*$ .*

Следует отметить, что характер влияния площади сопла на тягу и удельный расход топлива зависит от закона управления двигателем, точнее, от условия, при котором рассматривается это влияние. Чтобы убедиться в этом, проведем физический анализ влияния  $F_{c,kr}$  на параметры выполненного одновального ТРД, управляемого по закону

$n = \text{const}$  ( $G_B \approx \text{const}$ ). С увеличением  $F_{\text{с.кр}}$  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  $T_r^*$ , повышению пропускной способности камеры сгорания, а следовательно к снижению давления  $p_k^*$  за компрессором и соответствующему смещению рабочей точки на характеристике компрессора. Степень расширения  $\pi_{\text{с.р}}$  и температура  $T_T^*$  уменьшаются в этом случае не только за счет увеличения  $\pi_T^*$ , но и вследствие снижения  $\pi_k^*$  и  $T_r^*$ , соответственно. В результате  $\Delta K_y$  увеличивается, а удельная и полная тяга уменьшаются. Удельный расход топлива обычно снижается главным образом вследствие уменьшения  $T_r^*$ , (рисунок 2,б).

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

На двигателе с  $F_{\text{с.кр}} = \text{var}$  пониженную тягу можно получить при различных программах управления, например путем снижения температуры  $T_r^*$  при  $n = \text{const}$  или, наоборот, путем снижения  $n$  при  $T_r^* = \text{const}$ . 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  $n_{\text{пр}} = \text{const}$ , что соответствует увеличению запасов устойчивости, второй – смещением рабочей точки влево вниз по линии  $T_{\text{г.пр}}^* = \text{const}$ , что соответствует уменьшению  $\Delta K_y$ .

Таким образом, двигатель с  $F_{\text{с.кр}} = \text{var}$  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 рисунок 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.

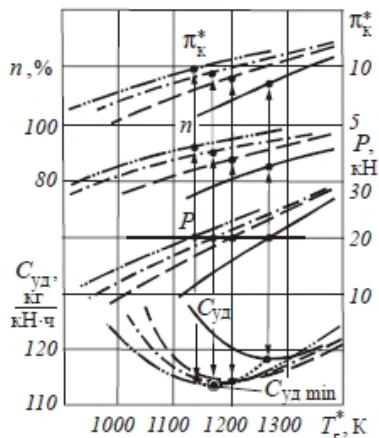


Рисунок 3 — К выбору оптимальной программы управления  
одновального ТРДД (  $H=11\text{км}$  ,  $M_n=1$  )  
(обозначения см. рис. 1)

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.



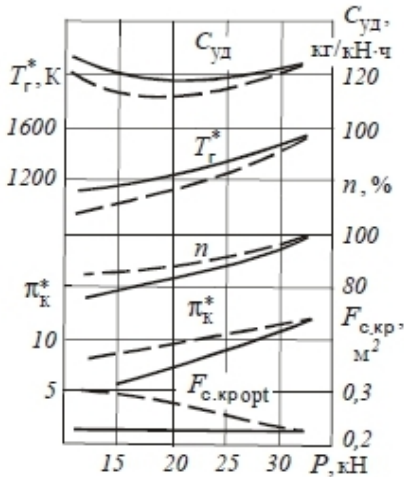


Рисунок 4 — Сравнение дроссельных характеристик  
 одновального ТРД ( $H=11 \text{ км}$ ,  $M_n=1$ ):  
 - - - - при оптимальной программе управления;  
 — при  $F_{с.кр} = const$ ;

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

$$T_g^* = \bar{T}_\alpha \bar{T}_{T_n} T_{g0}^*; \quad n = \bar{n}_\alpha \bar{n}_{T_n} n_0,$$

где  $\bar{T}_\alpha = T_g^*/T_{g0}^*$  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  $p_b$  ;
- полное давление рабочего тела в сечении на входе в компрессор  $p_b^*$  ;
- 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 одновального 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 одновального 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, характеризующихся 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

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

Таблица 2 (продолжение)

	$\bar{n}_{\text{пр}}$	$P_{\text{пр}}$	$C_{\text{уд.пр}}$	$G_{\text{т.ч.пр}}$	$G_{\text{в.пр}}$	$T_{\text{к.пр}}^*$	$T_{\text{т.пр}}^*$
	%	$\kappa H$	$\frac{\kappa \zeta}{\kappa H \cdot \zeta}$	$\frac{\kappa \zeta}{\zeta}$	$\frac{\kappa \zeta}{c}$	$K$	$K$
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 ЗАДАНИЯ 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  $\Delta K_y$  и  $C_{уд}$  при следующих условиях: а)  $n = const$  ; б)  $T_{г}^* = const$  .

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