

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 совместной работы узлов турбовинтового двигателя и его характеристик 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 совместной работы узлов турбовинтового двигателя и его характеристик 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. – 13 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.

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Совместная работа узлов и обобщенные характеристики одновального ТВД .....	4
2 Математическое моделирование одновального ТВД с помощью автоматизированной системы «АСТРА» .....	7
3 Цель, задачи и порядок выполнения лабораторной работы .....	8
4 Контрольные вопросы к отчету по лабораторной работе .....	12
Список использованной литературы.....	13

# 1 СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЗЛОВ И ОБОБЩЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОВАЛЬНОГО ТВД

Одновальный ТВД с воздушным винтом имеет два управляющих фактора: расход топлива и угол установки лопастей винта  $\phi_v$ . При изменении  $\phi_v$  изменяется мощность  $N_e$ , необходимая для вращения винта, и, соответственно, коэффициент отбора мощности  $\eta_{отб} \approx 1 - N_e / N_T$  (см. разд. 10.3.3 [1]), который входит в уравнение совместной работы узлов газогенератора (10.7) [1].

Если  $\phi_v = 0$ , то потребляемая винтом мощность близка к нулю, коэффициент отбора мощности  $\eta_{отб} \approx 1$  и закономерности совместной работы узлов одновального ТВД по существу не отличаются от закономерностей совместной работы узлов одновального газогенератора, подробно рассмотренных в разд. 11.1.1 [1]. Если  $\phi_v$  увеличивается, то коэффициент отбора мощности снижается, правая часть уравнения (10.7) [1] уменьшается при  $\pi_k^* = const$ , что ведет к снижению  $q(\lambda_v)$  и, следовательно, к снижению приведенного расхода воздуха  $G_{в.пр}$  (11.9) [1]. Рабочая точка на характеристике компрессора смещается влево к границе помпажа (рис. 1). Каждому значению  $\phi_v(\eta_{отб})$  соответствует определенное положение линии совместной работы на характеристике компрессора.

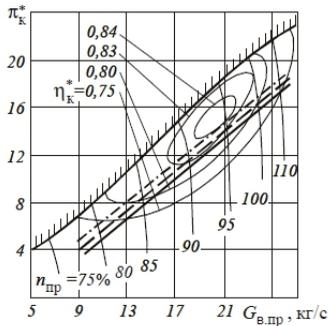


Рисунок 1 — Влияние  $\phi_v$  на положение линии совместной работы:

- — — — —  $\phi_v = 0$  ;
- - - - -  $\phi'_v > 0$  ;
- · - · -  $\phi''_v < \phi'_v$

Кроме того, положение линии совместной работы при

$\eta_{отб} = const$  зависит от числа  $M_{п}$  вследствие того, что турбовинтовые двигатели работают при докритическом истечении газа из сопла. Изменение числа  $M_{п}$  и, следовательно, суммарной степени повышения давления рабочего тела приводит в этих условиях к изменению степени понижения давления газа в турбине (см. разд. 10.2 и 10.5 [1]), а величина  $\pi_{т}^*$  входит в уравнение совместной работы узлов газогенератора (10.7) [1].

Проведем физический анализ влияния угла установки винта при  $n = const$  на положение рабочей точки на характеристике компрессора и основные данные одновального ТВД. С увеличением  $\varphi_{в}$  повышается потребная мощность винта, а сумма мощностей винта и компрессора становится больше располагаемой мощности турбины. Из условия обеспечения баланса мощности увеличивается расход топлива  $G_{т}$  и, соответственно, температура газа перед турбиной. Вследствие увеличения степени подогрева газа  $T_{г}^*/T_{к}^*$  снижается пропускная способность камеры сгорания (10.3) [1] и повышается давление  $p_{к}^*$ , т.е. степень повышения давления в компрессоре  $\pi_{к}^*$  (10.4) [1]. Рабочая точка на характеристике смещается к границе помпажа. Увеличение суммарной степени повышения давления в двигателе ведет к увеличению  $\pi_{т}^*$  и  $\pi_{с.р}$ . Работа и мощность турбины увеличиваются благодаря повышению не только  $T_{г}^*$ , но и  $\pi_{т}$ . Удельный расход топлива ТВД снижается, так как увеличение  $T_{г}^*$  и  $\pi_{к}^*$  приводит к повышению эффективного КПД двигателя.

Итак, положение рабочей точки на характеристике компрессора, все параметры газогенератора и основные данные одновального ТВД при неизменных внешних условиях определяются двумя независимыми переменными. При построении обобщенных характеристик в качестве независимых переменных нецелесообразно по ряду причин принимать управляющие факторы  $G_{т}$  и  $\varphi_{в}$ . (В частности потому, что двигатель и винт разрабатываются отдельно: винт не является узлом двигателя – это самолетный агрегат, характеристики которого в процессе доводки двигателя могут быть неизвестны.) Обычно характеристики строят в зависимости от частоты вращения ротора и температуры газа перед турбиной. В этом случае расчет и построение обобщенных характеристик целесообразно начинать с нанесения линий  $T_{г.пр}^* = const$  на характеристику

компрессора (10.5). Задаваясь рядом точек на этих линиях, можно рассчитать (см. разд. 14.5 [1]) удельные параметры и основные данные двигателя (рис. 2).

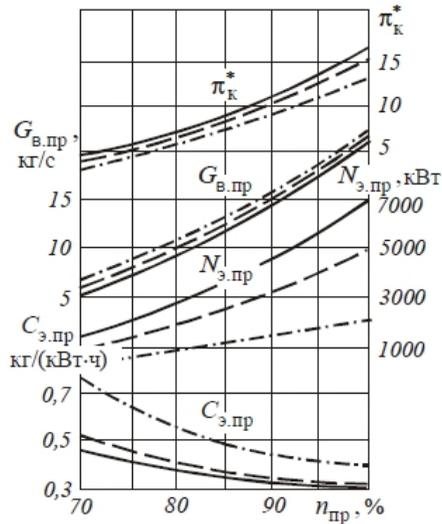


Рисунок 2 — Обобщенные характеристики одновального ТВД с изменяемым углом установки винта при  $M_{п}=0$  :

- — — — —  $T_{г.пр}^* = 1700 \text{ K}$  ;
- - - - -  $T_{г.пр}^* = 1400 \text{ K}$  ;
- · - · - ·  $T_{г.пр}^* = 1100 \text{ K}$

Таким образом, закономерности совместной работы узлов и обобщенные характеристики одновального ТВД при  $\phi_{в} = var$  аналогичны закономерностям совместной работы узлов и характеристикам одновального ТРД при  $F_{с.кр} = var$  (рис. 14.1 и 14.2 сравните соответственно с рис. 13.1 и 13.2). Действительно, увеличение  $\phi_{в}$  (как и уменьшение  $F_{с.кр}$ ) приводит к смещению линии совместной работы к границе помпажа, т.е. к уменьшению запасов устойчивой работы компрессора и к увеличению мощности на валу винта (тяги двигателя) при  $n = const$ . Однако эта аналогия неполная: при увеличении  $\phi_{в}$  (снижении  $F_{с.кр}$ ) степень понижения давления в турбине изменяется противоположно: в первом случае  $\pi_{т}^*$  увеличивается, а во втором – уменьшается. Кроме того, удельный расход топлива в первом случае снижается, а во втором – повышается.

## 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОВАЛЬНОГО ТВД С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ «АСТРА»

Для того, чтобы получить данные необходимые для исследования совместной работы узлов турбовинтового двигателя и его характеристик, студент выполняет расчётный эксперимент с помощью виртуальной модели рабочего процесса одновального ТВД, реализованной в автоматизированной системе термозодинамического расчёта и анализа АСТРА.

Исходными данными для выполнения расчётов являются:

- температура  $T_H^*$  и давление  $p_H^*$  атмосферного воздуха;
- коэффициент отбора мощности на привод винта  $\eta_{отб}$ ;
- относительная величина частоты вращения ротора  $\bar{n}$ .

Результатами расчётного эксперимента являются:

- тяга двигателя  $P$ ;
- эффективная мощность  $N_e$ ;
- эквивалентная мощность  $N_э$ ;
- эквивалентный удельный расход топлива  $C_э$ ;
- 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 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 расчетных экспериментов ТВД.

#### **Порядок проведения лабораторной работы**

1. Проверка готовности студентов к выполнению лабораторной работы. При домашней подготовке к лабораторной работе рекомендуется пользоваться учебником [1].
2. Проведение расчетного эксперимента.
3. Обработка результатов расчетного эксперимента, оформление протокола, построение графиков.
4. Письменный анализ результатов расчетного эксперимента и сдача лабораторной работы преподавателю.

#### **Проведение расчётного эксперимента**

Особенностью данной лабораторной работы является то, что данные, получаемые с помощью виртуальной модели ТВД, эквивалентны результатам испытания двигателя на наземном стенде.

Для исследования совместной работы узлов турбовинтового двигателя и его характеристик проводятся две серии расчётов при значениях коэффициента отбора мощности на привод винта  $\eta_{отб}=0,25$  и  $\eta_{отб}=0,40$ , что соответствует двум различным углам установки воздушного винта. При этом каждая серия расчётов включает определение параметров на четырёх установившихся режимах двигателя, характеризуемых относительными величинами частоты вращения ротора  $\bar{n}=60\%, 80\%, 90\%$  и  $100\%$ .

Внешние условия могут быть заданы произвольно по усмотрению преподавателя, например, они могут соответствовать реальным значениям температуры и давления атмосферного воздуха в момент проведения лабораторной работы.

### 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  $\pi_{\text{к}}^*$ ;
- эффективный удельный расход топлива  $C_{\text{э}}$ ;
- эквивалентный удельный расход топлива  $C_{\text{э}}$ ;
- приведённое значение относительной величины частоты вращения ротора  $\bar{n}_{\text{пр}}$ ;
- приведённое значение эффективной мощности  $N_{\text{е.пр}}$ ;
- приведённое значение эквивалентной мощности  $N_{\text{э.пр}}$ ;
- 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 расчёте расхода воздуха принимать  $F_{\text{в}} = 0,0123 \text{ м}^2$ .

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  $N_{\text{е.пр}}$ ,  $N_{\text{э.пр}}$ ,  $G_{\text{т.ч.пр}}$ ,  $G_{\text{в.пр}}$ ,  $\pi_{\text{к}}^*$ ,  $T_{\text{к.пр}}^*$ ,  $T_{\text{т.пр}}^*$ ,  $C_{\text{э}}$  как функции от  $\bar{n}_{\text{пр}}$  при различных значениях коэффициента отбора мощности на привод винта.

Таблица 1 — Результаты расчётных экспериментов

	$\eta_{отб}$	$\bar{n}$	$T_H^*$	$p_H^*$	$P$	$N_e$	$G_{т.ч}$	$T_K^*$	$T_T^*$	$p_B$	$p_B^*$	$p_K^*$
		%	$K$	$кПа$	$кН$	$кВт$	$\frac{к\mathcal{Z}}{ч}$	$K$	$K$	$кПа$	$кПа$	$кПа$
1	0,25	60										
2		80										
3		90										
4		100										
5	0,40	60										
6		80										
7		90										
8		100										

Таблица 2 — Результаты обработки расчётных экспериментов

	$\pi(\lambda_B)$	$q(\lambda_B)$	$G_B$	$\pi_K^*$	$C_e$
			$\frac{к\mathcal{Z}}{с}$		$\frac{к\mathcal{Z}}{кВт \cdot ч}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

Таблица 2 (продолжение)

	$\bar{n}_{\text{пр}}$	$N_{\text{е.пр}}$	$G_{\text{т.ч.пр}}$	$G_{\text{в.пр}}$	$T_{\text{к.пр}}^*$	$T_{\text{т.пр}}^*$
	%	<i>кВт</i>	$\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	<i>K</i>	<i>K</i>
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

### Анализ результатов. Основные выводы

В заключение необходимо проанализировать результаты, полученные в ходе выполнения лабораторной работы. Анализ результатов и основные выводы являются центральным местом работы. Этот раздел студент выполняет самостоятельно, в произвольной форме и достаточно тщательно. Целесообразно особенности совместной работы узлов одновального ТВД сравнить с особенностями совместной работы узлов двигателей других типов и схем, в частности, с особенностями ГРД с регулируемым соплом.

### Сдача лабораторной работы

Выполненная и оформленная работа сдается преподавателю. В процессе сдачи преподаватель задает 2-3 вопроса по особенностям совместной работы узлов одновального ТВД и характеру протекания его характеристик. Если студент не сдал работу, то лабораторная работа подлежит передаче после изучения соответствующих разделов курса.

#### 4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ОТЧЕТУ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Особенности совместной работы узлов одновального ТВД с винтом изменяемого шага.

2. Проведите физический анализ влияния угла установки лопастей винта на запасы устойчивой работы компрессора и основные данные одновального ТВД при  $n = const$ .

3. Сравните одновальный ТВД при  $\phi_v = var$  с одновальным ТРД при  $F_{с.кр} = var$ .

4. Изобразите обобщенные характеристики одновального ТВД.

5. Расскажите об особенностях управления одновального ТВД.

## **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.