

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(Самарский университет)

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЗЛОВ ВЫПОЛНЕННОГО ГТД И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве лабораторного практикума для студентов, обучающихся по программам высшего образования по укрупненной группе направлений и специальностей 24.00.00 Авиационная и ракетно-космическая техника

САМАРА
Издательство Самарского университета
2016

УДК 621.438(075)
ББК 39.15я7
С565

А в т о р ы :
*В.С. Кузьмичев, В.В. Кулагин, А.Ю. Ткаченко,
В.Н. Рыбаков, И.Н. Крупенич*

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. И.А. Кривошеев (УГАТУ);
д-р техн. наук, проф. В.В. Бирюк (Самарский университет)

Кузьмичев, Венедикт Степанович
С565 **Совместная работа узлов выполненного ГТД и его характеристики:** лаб. практикум / [В.С. Кузьмичев и др.]. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2016. – 64 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-1101-2

Изложена теория по совместной работе узлов выполненного двигателя и его характеристикам. Приведены содержание и методика проведения лабораторных работ по курсу «Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок», контрольные вопросы и задачи для проведения практических занятий.

Практикум предназначен для проведения лабораторных и практических занятий студентами, обучающимися по специальностям и направлениям подготовки 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей, 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов, 24.04.05 Двигатели летательных аппаратов.

УДК 621.438(075)
ББК 39.15я7

ISBN 978-5-7883-1101-2

© Самарский университет, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Условные обозначения	5
Предисловие.....	9
Лабораторная работа 5. Расчет и анализ климатических и скоростных характеристик ТРДД с одним управляющим фактором с помощью автоматизированной системы АСТРА.....	11
5.1 Цель и задачи лабораторной работы.....	11
5.2 Анализ основных характеристик ТРД(Д)	11
5.2.1 Дроссельные характеристики	12
5.2.2 Климатические характеристики	15
5.2.3 Скоростные характеристики	20
5.3 Порядок выполнения лабораторной работы	23
5.4 Сдача лабораторной работы. Контрольные вопросы	30
5.4.1 Контрольные вопросы.....	30
Лабораторная работа 6. Исследование влияния регулирования площадей сопла и соплового аппарата турбины на совместную работу узлов и характеристики одновального и двухвального ТРД с помощью автоматизированной системы АСТРА.....	32
6.1 Цель и задачи лабораторной работы.....	32
6.2 Совместная работа узлов, характеристики и управление ТРД с регулируемыми площадями сопла и соплового аппарата....	33
6.2.1 Особенности работы узлов газогенератора и обобщенные характеристики одновального ТРД при $F_{с,кр} = var$	33
6.2.2 Особенности влияния площади сопла на положение линий совместной работы на характеристиках каскадов компрессора ВД и НД в системе двухвального ТРД.....	36
6.2.3 Особенности влияния площади соплового аппарата турбины НД на положение линий совместной работы на характеристиках каскадов компрессора ВД и НД	37
6.3 Порядок выполнения лабораторной работы	38
6.4 Сдача лабораторной работы. Контрольные вопросы	45
6.4.1 Контрольные вопросы.....	45

Лабораторная работа 7. Анализ совместной работы узлов и характеристик одновального ТВД и ТВаД со свободной турбиной с помощью автоматизированной системы АСТРА	46
7.1 Цель и задачи лабораторной работы.....	46
7.2 Совместная работа узлов и характеристики турбовального двигателя со свободной турбиной (и одновальным газогенератором) и одновального ТВД	47
7.2.1 Анализ совместной работы узлов (протекания линии совместной работы) и дроссельных характеристик ТВаД.....	47
7.2.2 Анализ совместной работы узлов (протекания линии совместной работы) и дроссельных характеристик одновального ТВД при $n=\text{const}$	49
7.2.3 Особенности работы двигателя с двумя управляющими факторами. Сравнение одновального ТВД ($\varphi_b=\text{var}$) с одновальным ТРД ($F_{\text{с.кр}}=\text{var}$).....	49
7.3 Порядок выполнения лабораторной работы	54
7.4 Сдача лабораторной работы. Контрольные вопросы	61
7.4.1 Контрольные вопросы	61
Библиографический список	63

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $V_{\text{п}}$ — скорость полета, м/с
 H — высота полета, м (км)
 M — число Маха (отношение скорости потока к скорости звука)
 λ — приведенная скорость потока (отношение скорости потока к критической скорости звука)
 a — скорость звука, м/с
 c — скорость потока, м/с
 p — давление, Па (кПа)
 T — температура, К
 P — тяга двигателя, Н (кН)
 P_c — тяга сопла, Н (кН)
 $P_{\text{уд}}$ — удельная тяга двигателя, Н·с/кг (кН·с/кг):
 $P_{\text{уд}} = P/G \Sigma, P_{\text{уд}} G I = P/G I$
 $C_{\text{уд}}$ — удельный расход топлива, кг/(Н·ч) [кг/(кН·ч)]
 N — мощность, Вт (кВт)
 C_e — эффективный удельный расход топлива ТВ(В)Д, ТВаД, кг/(Вт·ч) [кг/(кВт·ч)]
 $M_{\text{дв}}$ — масса двигателя, кг
 $\gamma_{\text{дв}}$ — удельный вес двигателя
 πV — степень повышения давления во входном устройстве при изэнтропическом торможении
 π_k^* — степень повышения давления в компрессоре
 π_{Σ} — суммарная степень повышения давления
 $\pi_{k\Sigma}^*$ — суммарная степень повышения давления в компрессоре и вентиляторе внутреннего контура
 π_{Γ}^* — степень понижения давления в турбине
 $\pi_{\text{с.р}}$ — располагаемая степень понижения давления газа в канале сопла

$$\pi V = \frac{p_{\text{н}}^*}{p_{\text{н}}}; \pi_k^* = \frac{p_{\text{к}}^*}{p_{\text{в}}^*}; \pi_{\Sigma} = \frac{p_{\text{к}}}{p_{\text{н}}}; \pi_{\Gamma}^* = \frac{p_{\text{г}}^*}{p_{\text{т}}^*}; \pi_{\text{с.р}} = \frac{p_{\text{т}}}{p_{\text{н}}}$$
 n — частота вращения, с⁻¹
 L — удельная работа, Дж/кг (кДж/кг)
 Q — удельный подвод (отвод) тепла, Дж/кг (кДж/кг)
 i — удельная энтальпия, Дж/кг (кДж/кг)
 s — удельная энтропия, Дж/(кг·К) [кДж/(кг·К)]
 η — коэффициент полезного действия

- η_{Γ} — коэффициент полноты сгорания топлива
 ΔK_y — запас устойчивой работы
 m — степень двухконтурности
 x — коэффициент, характеризующий распределение энергии между контурами
 G — массовый расход, кг /с
 v_{j-i} — коэффициент, характеризующий изменение массы рабочего тела между сечениями j и i : $v_{j-i} = G_i / G_j$ (индекс j опускается, если он обозначает сечение В на входе в компрессор)
 v'_{Γ} — коэффициент, характеризующий изменение массы воздуха между сечениями В и Г
 F — площадь проходного сечения, м²
 ρ — плотность, кг /м³
 q_{Γ} — отношение расхода топлива к расходу воздуха, проходящего через камеру сгорания
 q — скоростной напор, Н/м² (кН/м²)
 α — коэффициент избытка воздуха в основной камере сгорания
 α_{Σ} — коэффициент избытка воздуха в форсажной камере
 L_0 — количество воздуха, теоретически необходимое для полного сжигания 1 кг топлива
 L_{Π} — дальность полета, м (км)
 R — универсальная газовая постоянная, Дж / (кг · К)
 k, k_z — показатель изоэнтропы для воздуха, газа
 c_p, c_{p_z} — средняя удельная теплоемкость для воздуха, газа, Дж/(кг · К) [кДж/(кг · К)]
 $c_{p_{к.с}}$ — условная удельная теплоемкость рабочего тела в камере сгорания, Дж/(кг · К) [кДж/(кг · К)]
 m_z — численный коэффициент в уравнении расхода, (кг · К/Дж)^{0,5}: $m_v = 0,0405$ (для воздуха), $m_z = 0,0397$ (для газа)
 μ — коэффициент расхода
 c_x — коэффициент аэродинамического сопротивления
 σ — коэффициент восстановления полного давления
 φ_c — коэффициент скорости реактивного сопла
 φ — коэффициент расхода входного устройства
 X — внешнее аэродинамическое сопротивление, Н (кН)
 H^u — низшая удельная теплота сгорания топлива, Дж/кг (кДж /кг)
 l — относительная удельная работа:
 $l_{\kappa} = L_{\kappa} / c_p T_{\text{в}}^*$; $l_{\Gamma} = L_{\Gamma} / c_{p_z} T_{\Gamma}^*$

Индексы

- * — параметры заторможенного потока
в — винт, вентилятор
в — воздух

ВД	—	каскад высокого давления
вх	—	входное устройство
г	—	газ
гг	—	газогенератор
дв	—	двигатель
е	—	эффективный
ид	—	идеальный
исх	—	исходный
к	—	компрессор
кан	—	канал наружный
кр	—	крейсерский, критический
к.с	—	камера сгорания
НД	—	каскад низкого давления
о	—	общий
0	—	параметры максимального режима в САУ на уровне моря при $M_n = 0$
отб	—	отбор
opt	—	оптимальный
п	—	полетный
пр	—	предельный, приведенный
п.с	—	подпорные ступени
р	—	расширение, расчетный
с	—	сопло, секундный
с. а	—	сопловой аппарат
СД	—	каскад среднего давления
сж	—	сжатие
см	—	смещение
ср	—	средний, срез
с.т	—	свободная турбина
с.у	—	силовая установка
т	—	турбина, топливо
теп	—	тепловой
тк	—	турбокомпрессор
уд	—	удельный
ф	—	форсажная камера
ч	—	часовой
э	—	эквивалентный
эк	—	экономический
эф	—	эффективный
г	—	гидравлический
т	—	механический
с	—	изоэнтропный
Σ	—	суммарный
I	—	внутренний контур ТРДД
II	—	наружный контур ТРДД

Основные сечения потока

Н	—	невозмущенный поток перед двигателем
ВХ	—	вход во входное устройство

- В — вход в компрессор
- К — выход из компрессора
- Г — вход в турбину
- Т — выход из турбины
- Ф — выход из форсажной камеры
- С — выход из реактивного сопла
- С.КР — критическое сечение сопла
- I — выход из внутреннего контура ТРДД (вход в сопло или в камеру смешения)
- II — выход из наружного контура (канала) ТРДД (вход в сопло или камеру смешения)

Сокращения

- ВСУ — вспомогательная силовая установка
- ВУ — входное устройство
- ГТД — газотурбинный двигатель
- кВ(Н)Д — компрессор высокого (низкого) давления
- ЛА — летательный аппарат
- л.с.р — линия совместной работы
- н.а — направляющий аппарат
- ПВРД — прямоточный воздушно-реактивный двигатель
- РУД — рычаг управления двигателем
- САУ — стандартные атмосферные условия
- ТВаД — турбовальный двигатель
- ТВ(В)Д — турбовинтовой (турбовинтовентиляторный) двигатель
- ТРД(Д) — турбореактивный двигатель (двухконтурный)
- ТРДДсм — двухконтурный турбореактивный двигатель со смешением потоков
- ТРДДФ — двухконтурный турбореактивный двигатель с форсажной камерой

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время наблюдается непрерывное усложнение авиационных двигателей и энергоустановок, усложнение и удорожание процессов их создания и эксплуатации. В этой связи все большее значение приобретает качество подготовки специалистов, способных создавать и эксплуатировать высокоэффективные современные и перспективные авиационные двигатели и энергетические установки. При этом глубокие знания теории газотурбинных двигателей являются непременным условием подготовки таких специалистов. Для этого в Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королева разработан и апробирован в учебном процессе методически новый подход, изложенный в учебниках [1,2], в котором теория газотурбинных двигателей различных типов излагается обобщенно, а за основу принят ТРДД как наиболее общий тип двигателя; одноконтурные ТРД и турбовинтовые двигатели описаны как частные случаи двухконтурных, а одновальные – как частные случаи двухвальных. Такой подход позволяет провести четкий системный анализ двигателей различных типов, увидеть общие для них закономерности, выделить присущие им особенности.

Одним из аспектов повышения уровня подготовки специалистов в области теории и проектирования ГТД являются их экспериментальные исследования. Однако такие исследования являются весьма дорогостоящими и ограничены возможностями экспериментальных стендов. Для учебного процесса вполне допустимо заменить натурные эксперименты их имитационным компьютерным моделированием на основе специализированных автоматизированных систем инженерного анализа (CAE-систем). На кафедре теории двигателей летательных аппаратов Самарского университета для этих целей создана CAE-система термодинамического расчета и анализа АСТРА.

Данный лабораторный практикум по курсу «Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок» включает три компьютерные лабораторные работы, является дополнением к учебнику [2] и продолжением лабораторного практикума «Исследование закономерностей изменения удельных параметров проектируемого ГТД», поэтому начинается с 5 лабораторной работы. Каждая из лабора-

торных работ содержит краткую теоретическую часть, цель и порядок выполнения работы, контрольные вопросы и задачи.

Практикум предназначен для студентов, обучающихся по специальностям и направлениям подготовки 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей, 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов», 24.04.05 Двигатели летательных аппаратов.

Авторы считают своим долгом выразить глубокую благодарность сотрудникам кафедры теории двигателей летательных аппаратов Самарского университета, а также рецензентам – д-ру техн. наук, проф. И.А. Кривошееву (УГАТУ) и д-ру техн. наук, проф. В.В. Бирюку (Самарский университет) за ценные замечания и предложения.

Лабораторная работа 5

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ И СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРДД С ОДНИМ УПРАВЛЯЮЩИМ ФАКТОРОМ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АСТРА

5.1 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Целью лабораторной работы является закрепление и углубление теоретических знаний, полученных в рамках изучения раздела курса лекций «Основные характеристики ТРД(Д). Методы их расчета и анализа. Термодинамические основы управления двигателем» [2, гл. 12], развитие навыков анализа результатов численного эксперимента.

Задачи лабораторной работы:

1. Расчет климатических характеристик двухвального ТРДД при $n_{ВД}=100\%$ и с ограничением давления за компрессором.
2. Расчет скоростных характеристик двухвального ТРДД при двух законах регулирования: $n_{ВД}=100\%$ и $n_{НД}=100\%$.
3. Анализ полученных результатов, выбор и обоснование наиболее рационального закона управления двигателем и формулирование выводов.

Основное внимание при выполнении лабораторной работы должно быть уделено анализу результатов и выводам.

5.2 АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРД(Д)

Характеристики двигателя – это зависимости основных данных, удельных параметров, температуры, давления газа в различных сечениях проточной части и других параметров двигателя от режима его работы или от внешних – атмосферных (p_n, T_n) и полетных (H, V_n) – условий. Они разделяются соответственно на дроссельные и внешние. Внешние характеристики подразделяются на климатические, высотные и скоростные – это зависимости перечисленных параметров соответ-

венно от давления и температуры наружного воздуха, от высоты и скорости полета при работе двигателя на постоянном режиме.

Зависимость параметров двигателя от различных факторов целесообразно анализировать двумя методами:

А – на основании анализа обобщенных характеристик (назовем его А-методом);

Б – путем термогазодинамического анализа изменения параметров в характерных сечениях проточной части в последовательности, принятой для второго варианта расчета характеристик [2, разд. 12.2], т.е. начиная с параметров турбины (назовем его Б-методом).

Анализ характеристик двигателя недостаточно выполнить одним методом, так как это обычно не позволяет получить однозначный вывод об изменении удельных параметров и основных данных двигателя. Кроме того, нужно стремиться подтвердить полученный вывод другим методом анализа, поскольку совпадение результатов, полученных различными методами, является критерием правильности проведенного анализа.

Для А-метода характерна такая последовательность анализа: параметры режима → критерии подобия → положение рабочей точки на характеристике компрессора → приведенные параметры турбокомпрессора → приведенные параметры сопла и двигателя в целом → физические параметры.

Для Б-метода характерна другая последовательность: параметры режима → $m_{ВД}$ → $m_{НД}$ → $VУ$ → $\kappa_{НД}$ → $\kappa_{ВД}$ → $K.C$ → сопло → удельные параметры двигателя и тяга. При этом предполагается, что истечение газа из сопла – сверхкритическое, т.е. степени понижения давления в турбинах и соответствующие относительные работы сохраняются постоянными: $\pi_{тВД}^* = \text{const}$, $l_{тВД} = \text{const}$, $\pi_{тНД}^* = \text{const}$, $l_{тНД} = \text{const}$, а удельные работы $L_{тВД}$ и $L_{тНД}$ изменяются пропорционально температуре газа $T_{г}^*$.

5.2.1 Дроссельные характеристики

Дроссельными характеристиками называют зависимости тяги, удельного расхода топлива, расхода воздуха, температуры и давления рабочего тела в различных сечениях и других параметров двигателя от режима его работы, построенные для неизменных внешних условий. Режим работы двигателя задается расходом топлива, температурой газа

перед турбиной, частотой вращения ротора или каким-либо другим параметром. Дроссельные характеристики могут быть построены по любому из них, а также по тяге или углу установки РУД. Во многих случаях дроссельные характеристики строятся по частоте вращения ротора (рис. 5.1).

Проанализируем зависимости параметров двухвального ТРД(Д) от режима Б-методом (начиная с параметров турбины) в целях отработки методики такого анализа.

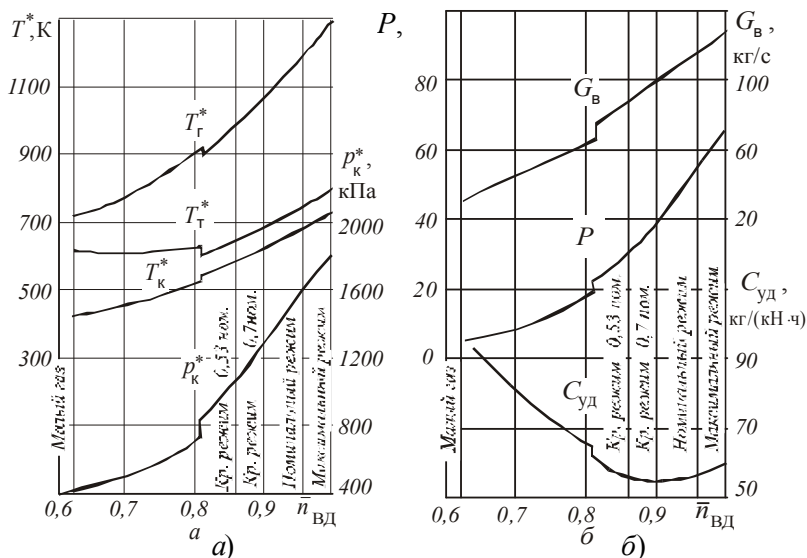


Рис. 5.1. Дроссельные характеристики двухвального ТРДД при $H = 0$, $M_{п} = 0$, $T_{п} = 288 \text{ K}$, $p_{п} = 101,3 \text{ кПа}$

Пусть расход топлива через двигатель уменьшается. Соответственно снижается температура газа перед турбиной, что ведет к снижению работы турбины ВД $L_{ТВД} = c_{p2} T_{г}^* l_{ТВД}$ и температуры за ней $T_{тВД}^* = T_{г}^* (1 - l_{ТВД})$. Аналогично изменяются работа турбины НД $L_{ТНД}$ и температура за ней $T_{т}^*$.

Работа компрессора НД изменяется в соответствии с уравнением баланса мощности (10.9) [2]: в случае ТРД она снижается пропорционально $L_{ТНД}$. На ТРДД она тем более снижается, поскольку зависит от степени двухконтурности, которая возрастает. Снижение $L_{кНД}$ приводит

к уменьшению степени повышения давления в компрессоре $\pi_{\text{кнд}}^*$ и температуры за ним $T_{\text{ввд}}^*$. Аналогично изменяются работа и параметры кВД: $L_{\text{квд}}$, $\pi_{\text{квд}}^*$ и $T_{\text{к}}^*$. Такое изменение параметров компрессора сопровождается снижением частот вращения роторов и смещением рабочих точек на характеристиках компрессоров влево вниз по линии совместной работы: уменьшаются давления p_i^* и температуры T_i^* во всех сечениях двигателя и расход воздуха через него.

Уменьшаются параметры сопла: $\pi_{\text{с.р}}$ – вследствие снижения $\pi_{\text{к}}^*$, согласно уравнениям баланса давлений (10.11) и (10.12) [2], скорость истечения $c_{\text{с}}$ – вследствие снижения $\pi_{\text{с.р}}$ и температуры газа перед соплом. Соответственно снижаются удельные тяги $P_{\text{уд I}}$ и $P_{\text{уд II}}$. Абсолютная тяга P наружного и внутреннего контуров и двигателя в целом снижается, кроме того, из-за уменьшения расхода воздуха. Проведенный анализ представим в следующем виде [2]:

$$G_{\text{T}} \downarrow \rightarrow T_{\text{Г}}^* \downarrow \rightarrow L_{\text{ТВД}} \downarrow \quad (8.6), \quad T_{\text{ТВД}}^* \downarrow \rightarrow L_{\text{ТНД}} \downarrow, \quad T_{\text{T}}^* \downarrow \rightarrow L_{\text{кнд}} \downarrow \quad (10.9), \quad \pi_{\text{кнд}}^* \downarrow \quad (8.4), \quad T_{\text{кнд}}^* \downarrow \quad (8.5) \rightarrow L_{\text{квд}} \downarrow, \quad \pi_{\text{квд}}^* \downarrow, \quad T_{\text{к}}^* \downarrow \rightarrow n_{\text{нд}} \downarrow, \quad n_{\text{вд}} \downarrow \rightarrow \text{р.т.} \downarrow, \quad q(\lambda_{\text{в}}) \downarrow \rightarrow p_i^* \downarrow, \quad T_i^* \downarrow \rightarrow G_{\text{в}} \downarrow \rightarrow \pi_{\text{с Ip}} \downarrow \quad (10.11), \quad \pi_{\text{с IIp}} \downarrow \quad (10.12), \quad c_{\text{с}} \downarrow \quad (3.11) \rightarrow P_{\text{уд}} \downarrow, \quad P_{\text{I}} \downarrow, \quad P_{\text{II}} \downarrow, \quad P \downarrow.$$

Он не позволяет установить, как изменяется удельный расход топлива, поскольку при снижении $T_{\text{Г}}^*$ соответственно уменьшаются и числитель, и знаменатель в формуле (7.3) [1]. Поэтому необходимо проанализировать влияние параметров цикла на $C_{\text{уд}}$ методом «работы цикла» [1, гл. 7]. В [1, разд. 7.2] показано, что снижение $T_{\text{Г}}^*$ и $\pi_{\text{к}}^*$ приводит к увеличению полетного КПД $\eta_{\text{п}}$ (при $V_{\text{п}} > 0$) и к снижению эффективно-го КПД $\eta_{\text{е}}$. Противоположное влияние двух факторов приводит к образованию минимума удельного расхода топлива: преобладающее влияние вначале оказывает первый фактор ($\eta_{\text{п}}$), а затем – второй ($\eta_{\text{е}}$).

Итак, при снижении режима основные данные и параметры двигателя изменяются весьма существенно (см. рис. 5.1). В диапазоне режимов от максимального до малого газа тяга двигателя уменьшается в 15...30 раз (в результате обеспечивается широкий диапазон потребных тяг). Удельный расход топлива изменяется почти в 2 раза. Расход воздуха уменьшается примерно в 4 раза, а частота вращения ротора – в 1,5...2 раза. В основном рабочем диапазоне режимов (от максимального до 0,7 номинального) частота вращения ротора снижается примерно на

10 % при уменьшении тяги на 40 %. Скачок параметров при $n_{ВД} = 0,81$ вызван переключением клапанов перепуска воздуха из компрессора ВД. Влияние перепуска на работу двигателя анализируется в [2, разд. 13.2.3].

Дроссельная характеристика, построенная для САУ (см. рис. 5.1), не отличается от обобщенных характеристик. Дроссельные характеристики, построенные для внешних условий, отличных от стандартных, являются частным случаем обобщенных, а анализ закономерности изменения параметров по $n_{ВД пр}$, а также особенности обобщенных характеристик двухвальных ТРДД и ТРД, изложенные в [2, разд. 11.3], относятся и к дроссельным характеристикам этих двигателей. Соотношение между дроссельными и обобщенными характеристиками показано на рис. 5.2.

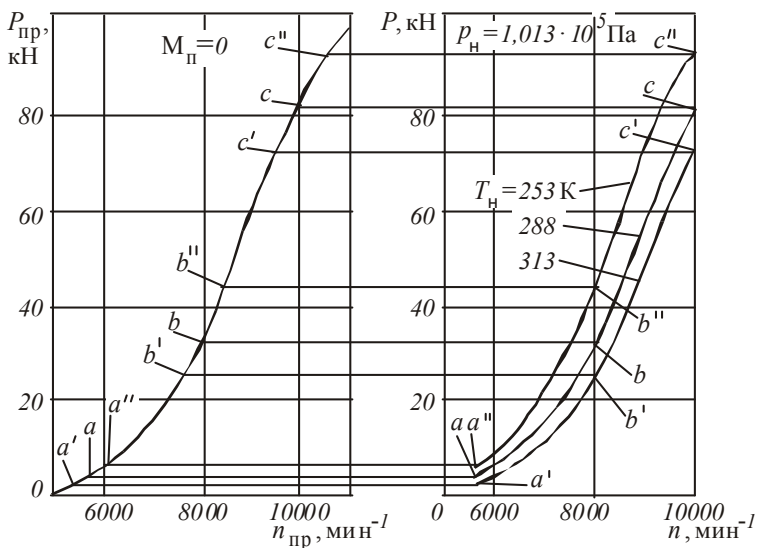


Рис. 5.2. Соотношение между дроссельными и обобщенными характеристиками, $M_{\pi} = 0$

5.2.2 Климатические характеристики

Зависимости тяги и других параметров двигателя от давления p_n и температуры T_n наружного воздуха при работе двигателя на постоянном режиме и при $N = \text{const}$, $V_{\pi} = \text{const}$ называют климатическими

характеристиками. Существенное влияние климатические характеристики оказывают на взлетные качества самолета. Поэтому здесь они анализируются для максимального режима работы двигателя при $H = 0$, $M_{\text{п}} = 0$ (при этом $T_{\text{н}}^* = T_{\text{н}}$ и $p_{\text{н}}^* = p_{\text{н}}$). Пусть режим работы задается в первом приближении постоянной частотой вращения ротора $n_{\text{ВД}} = \text{const}$.

Влияние $p_{\text{н}}$. С изменением давления $p_{\text{н}}$ при $T_{\text{н}} = \text{const}$ приведенная частота вращения ротора $n_{\text{ВД пр}}$ [2, (11.3а)] сохраняется постоянной. Поскольку два критерия подобия $M_{\text{п}}$ и $n_{\text{ВД пр}}$ постоянны, то режимы двигателя подобны. Положение рабочих точек на характеристиках всех узлов, степени повышения (понижения) давления и температуры сохраняются неизменными. Так как температура $T_{\text{н}}$ постоянна по условию, то постоянны также температура рабочего тела T_i^* и скорости потока c_i во всех сечениях двигателя. Не изменяются, следовательно, удельная работа узлов и удельные параметры двигателя в целом. Согласно формулам приведения пропорционально атмосферному давлению изменяются давление рабочего тела во всех сечениях p_i^* , расход воздуха, расход топлива и тяга двигателя.

Влияние $T_{\text{н}}$. Зависимость параметров двигателя от температуры $T_{\text{н}}$ при $p_{\text{н}} = \text{const}$ проанализируем вначале А-методом (на основании обобщенных характеристик). С увеличением $T_{\text{н}}$ приведенная частота $n_{\text{ВД пр}}$ уменьшается; следовательно, рабочая точка на характеристиках компрессора смещается влево вниз, снижаются параметры, характеризующие положение рабочей точки: $\pi_{\text{к}}^*$ и $q(\lambda_{\text{в}})$. Соответственно снижаются давление p_i^* в различных сечениях двигателя и приведенный расход воздуха $G_{\text{в пр}}$. Из обобщенных характеристик видно [2, рис. 11.7, а, б и 11.8], что при уменьшении приведенной частоты снижаются все параметры, характеризующие работу турбокомпрессора (за исключением степени двухконтурности m и скольжения роторов $n_{\text{ВД}}/n_{\text{НД}}$, которые увеличиваются), в том числе его выходные параметры: степень повышения давления $\pi_{\text{тк}}^*$ и приведенная температура за турбиной $T_{\text{т пр}}^*$. Соответственно снижаются параметры сопла (степень понижения давления $\pi_{\text{с пр}}$ и приведенная скорость истечения газа $c_{\text{с пр}}$), а также удельная $P_{\text{уд пр}}$ и абсолютная $P_{\text{пр}}$ тяги.

Проделанный анализ представим в сокращенном виде [2]:

$$T_n \uparrow \text{ при } n_{ВД} = \text{const}: n_{ВД\text{пр}} \downarrow \rightarrow \text{р.т.} \downarrow \rightarrow \pi_{кНД}^* \downarrow, q(\lambda_B) \downarrow, \\ \pi_{кВД}^* \downarrow, q(\lambda_{ВД}) \downarrow \rightarrow p_i^* \downarrow, T_{i\text{пр}}^* \downarrow, G_{В\text{пр}} \downarrow \rightarrow G_{т.\text{пр}} \downarrow, m \uparrow, \\ \pi_{тк}^* \downarrow, T_{т.\text{пр}}^* \downarrow \rightarrow, \pi_{с\text{Iр}} \downarrow, \pi_{с\text{IIр}} \downarrow, c_{с\text{Iр}} \downarrow, c_{с\text{IIр}} \downarrow \rightarrow P_{уд.\text{пр}} \downarrow, \\ P_{\text{пр}} \downarrow \rightarrow G_B \downarrow, P \downarrow.$$

Физический расход воздуха при этом уменьшается более значительно, чем приведенный, а физическая тяга изменяется так же, как и приведенная, что следует из формул (11.4) и (11.6) [2].

Из анализа А-методом не видна взаимосвязь параметров и не всегда ясны физические причины их изменения. Кроме того, не установлен характер изменения удельной тяги и удельного расхода топлива. Чтобы восполнить этот пробел, подтвердить полученные результаты и убедиться в их правильности, проанализируем изменение параметров при увеличении температуры наружного воздуха Б-методом, полагая, что при $n_{ВД} = \text{const}$ температура газа перед турбиной сохраняется постоянной [2]:

$$T_n \uparrow \text{ при } T_{г}^* = \text{const} : L_{тВД} = \text{const}, T_{тВД}^* = \text{const} \rightarrow L_{тНД} = \text{const}, \\ T_{т}^* = \text{const} \rightarrow L_{кНД} \downarrow \text{ (10.9)}, \pi_{кНД}^* \downarrow, T_{кНД}^* \uparrow \rightarrow L_{кВД} = \text{const}, \\ \pi_{кВД}^* \downarrow, T_{к}^* \uparrow \rightarrow q_{т} \downarrow \rightarrow \text{р.т.} \downarrow, q(\lambda_B) \downarrow \rightarrow p_i^* \downarrow \rightarrow \pi_{с\text{Iр}} \downarrow, \pi_{с\text{IIр}} \downarrow, c_{с\text{I}} \downarrow, \\ c_{с\text{II}} \downarrow \rightarrow P_{уд\text{I}} \downarrow, P_{уд\text{II}} \downarrow \rightarrow G_{\Sigma} \downarrow \rightarrow P \downarrow.$$

Итак, при $T_{г}^* = \text{const}$ работа турбины и температура газа в ее характерных сечениях сохраняются неизменными, поскольку по условию $\pi_{т}^* = \text{const}$ ($\lambda_c \geq 1$). Степень повышения давления компрессора (а следовательно и p_i^*) уменьшается с увеличением T_n вследствие повышения упругости воздуха (в случае ТРДД уменьшается, кроме того, работа $L_{кНД}$ из-за увеличения степени двухконтурности, что также ведет к снижению $\pi_{кНД}^*$). Пропорционально $\pi_{к}^*$ уменьшается $\pi_{с.\text{р}}$ и, соответственно, скорость истечения c_c и удельная тяга $P_{уд}$. Расходы воздуха G_{Σ} и G_I уменьшаются с увеличением T_n , что следует из формулы расхода, выраженной через параметры рабочего тела в сечении на входе в вентилятор и в минимальном сечении соплового аппарата турбины. В последнем случае при $T_{г}^* = \text{const}$ и $q(\lambda_{с.а}) = \text{const}$ расход воздуха пропорционален давлению газа на входе в турбину, или $G_{В\text{I}} = \text{const} \pi_{к\Sigma}^*$.

Эти два метода анализа хорошо дополняют друг друга. Например, затруднительно доказать, как изменяется температура за компрессором НД ТРДД, так как в формуле (8.5) [1] с увеличением T_n значение $L_{кНД}$

снижается. Однако если иметь в виду, что при этом работа $L_{\text{кВД}}$ постоянна (известно из анализа Б-методом), а $\pi_{\text{кВД}}^*$ снижается (доказано А-методом), то понятно, что это снижение обусловлено увеличением температуры $T_{\text{кНД}}^*$.

Однако оба метода в рассматриваемом случае не дают однозначного ответа на вопрос об изменении удельного расхода топлива. Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо обратиться к анализу параметров методом работы цикла: в [1, разд. 7.2] показано, что уменьшение $\pi_{\text{к}}^*$ (в диапазоне достигнутых значений) ведет к увеличению $C_{\text{уд}}$ вследствие снижения эффективного КПД.

Тяга двигателя с увеличением $T_{\text{н}}$ значительно уменьшается, так как снижаются и удельная тяга, и расход воздуха. Например, в диапазоне температур от 233 до 313 К тяга может уменьшиться более чем на 30 % (рис. 5.3). Такое снижение тяги недопустимо, так как оно приводит к снижению тяговооруженности самолета в летних условиях и ухудшает его взлетные качества. Поэтому перед создателями двигателя ставится задача обеспечения заданной максимальной тяги не в стандартных, а в более тяжелых для взлета условиях при $T_{\text{н}} = 303 \text{ К}$ и $p_{\text{н}} = 97,3 \text{ кПа}$.

Двигатель проектируется из условия удовлетворения этому требованию. Тогда применение закона управления $n_{\text{ВД}} = \text{const}$ будет приводить к превышению в зимних условиях максимальной заданной тяги. Увеличатся также давление рабочего тела в проточной части, расход воздуха, топлива и другие параметры. Соответственно повысятся нагрузки на узлы и элементы конструкции: увеличатся растягивающие усилия на оболочках, изгибные напряжения в лопатках компрессора и турбины, осевые усилия на подшипниках и крутящие моменты на валах. Двигатель в зимних условиях будет перегруженным, а следовательно и перетяжеленным. Поэтому рассматриваемый закон управления применять на максимальном режиме в широком диапазоне температур $T_{\text{н}}$ нецелесообразно.

Чтобы не перегружать двигатель в зимних условиях и уменьшить его массу, максимальную тягу ограничивают, например, путем ограничения максимального давления за компрессором из условия $p_{\text{к}}^* \leq p_{\text{к max}}^*$. (Если давление за компрессором в данных условиях работы больше $p_{\text{к max}}^*$, то ограничитель давления подает сигнал на уменьшение расхода топлива, обеспечивая таким образом $p_{\text{к}}^* = p_{\text{к max}}^*$.) Если в этом случае и $p_{\text{н}} = \text{const}$, то имеем $\pi_{\text{к} \Sigma \text{max}}^* = \text{const}$, т.е. положение рабочей точки на ха-

всех параметров и тяги в зависимости от температуры наружного воздуха можно обеспечить, выбрав закон управления $n_{ВД(НД)} = f(T_H)$, см. рис. 5.3. Таким образом, даже при изменении T_H в сравнительно узком диапазоне (от 213 до 333 К) неприемлем простой закон управления $n_{ВД} = \text{const}$ или $T^*_Г = \text{const}$. Законы управления современных двигателей, выбранные из условия обеспечения потребной тяги, более сложные. С еще большим основанием это относится к двигателям, предназначенным для сверхзвуковых скоростей полета, которые работают в более широком диапазоне изменения температур T^*_H .

5.2.3 Скоростные характеристики

Зависимости тяги, удельного расхода топлива и других параметров от скорости полета (или от числа M_H) при работе двигателя на постоянной высоте и постоянном режиме называются скоростными характеристиками (рис. 5.4).

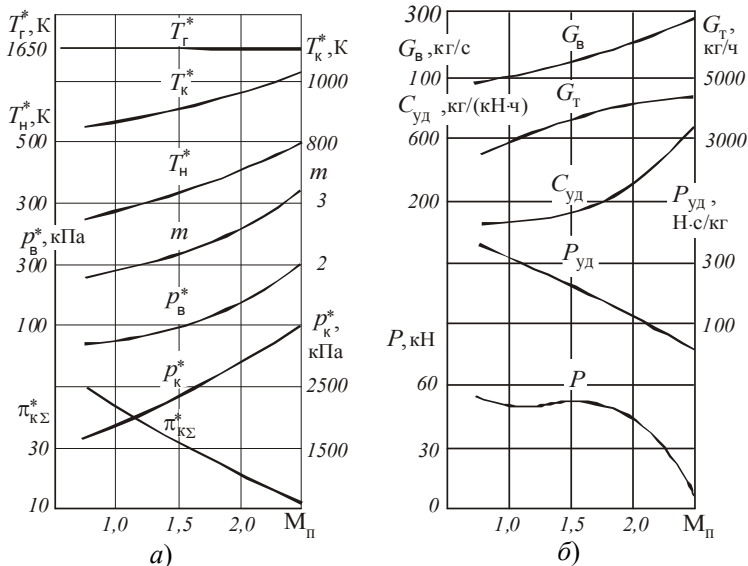


Рис. 5.4. Скоростные характеристики двухвального ТРДД на максимальном режиме в САУ при $T^*_Г = \text{const}$, $H = 11$ км

Проанализируем изменение параметров двухвального ТРДД с увеличением скорости полета при условии, что режим работы задан температурой $T^*_Г$.

А-метод: $V_{II} \uparrow (T^*_{н} \uparrow, \pi_V \uparrow, p^*_в \uparrow)$ при $T^*_Г = \text{const}$:

$T^*_{Г.пр} \downarrow \rightarrow p.T. \swarrow \rightarrow \pi^*_{кНД} \downarrow, q(\lambda_в) \downarrow, \pi^*_{кВД} \downarrow, q(\lambda_{вВД}) \downarrow \rightarrow \pi^*_{тк} \downarrow,$
 $T^*_{Г.пр} \downarrow \rightarrow G_{в.пр} \downarrow \rightarrow m \uparrow, (n_{ВД}/n_{НД}) \uparrow.$

Анализировать А-методом изменение параметров сопла и тяги в рассматриваемом случае затруднительно, так как вследствие изменения числа M_{II} связь этих параметров с величиной $T^*_{Г.пр}(n_{пр})$ неоднозначна [2, рис. 11.8].

Б-метод: $V_{II} \uparrow (T^*_{н} \uparrow, \pi_V \uparrow, p^*_в \uparrow)$ при $T^*_Г = \text{const}$:

$L_{тВД} = \text{const}, T^*_{тВД} = \text{const} \rightarrow L_{тНД} = \text{const}, T^*_{т} = \text{const} \rightarrow$
 $L_{кНД} \downarrow, \pi^*_{кНД} \downarrow, T^*_{кНД} \uparrow \rightarrow L_{кВД} = \text{const}, \pi^*_{кВД} \downarrow, T^*_{к} \uparrow \rightarrow \dots$

Из проделанного анализа следует, что с увеличением V_{II} параметры, характеризующие работу турбокомпрессора, изменяются так же, как и при увеличении $T_{н}$ [2, разд. 12.3.2], поскольку в обоих случаях повышается полная температура воздушного потока на входе в двигатель и рабочая точка на характеристике компрессора смещается влево вниз. Работа турбин и компрессоров сохраняется постоянной (за исключением $L_{кНД}$, которая на ТРД также постоянна, а на ТРДД снижается), температура газа в характерных сечениях турбины постоянна, а в сечениях компрессора повышается, степень двухконтурности и скольжение частот вращения роторов увеличиваются.

Однако в отличие от рассмотренного в [2, разд. 12.3.2] случая, когда увеличивалась только температура $T^*_н$, с увеличением скорости полета растет степень повышения давления от скоростного напора π_V . Следовательно, в воздухозаборнике и турбокомпрессоре степени повышения давления изменяются противоположно, и логическим анализом нельзя однозначно установить, как изменяются параметры сопла и двигателя в целом. Поэтому анализ скоростных характеристик наиболее сложен.

Чтобы дать правильный ответ на поставленный вопрос, необходимо помнить, что зависимость полной температуры $T^*_н$ и давления $p^*_в$ воздушного потока от скорости полета, как следует из анализа формул (2.4) и (2.5) [1], имеет параболический характер: увеличение скорости полета

приводит вначале к незначительному, а потом ко все более интенсивному росту давления $p^*_в$. Так, с увеличением $M_{п}$ от 0 до 1 π_{γ} увеличивается от 1 до 1,9, т.е. менее чем в два раза, а при увеличении $M_{п}$ от 1 до 2 она увеличивается более чем в четыре раза [1, разд. 2.1.2].

*Рост π_{γ} оказывает преобладающее влияние на суммарную степень повышения давления. Соответственно увеличивается давление рабочего тела во всех сечениях проточной части двигателя. Давление перед турбиной $p^*_г$ однозначно определяет расход воздуха через внутренний контур, который, таким образом, изменяется пропорционально суммарной степени повышения давления. Суммарный расход воздуха через двигатель увеличивается еще больше, так как при этом растет и степень двухконтурности.*

Рост π_{γ} оказывает также преобладающее влияние на $\pi_{сIр}$ и $\pi_{сIIр}$, которые увеличиваются по $V_{п}$. Соответственно увеличиваются $c_{сI}$ и $c_{сII}$. Итак,

$$\rightarrow \pi_{\Sigma} \uparrow \rightarrow p^*_i \uparrow \rightarrow G_{вI} \uparrow, G_{в\Sigma} \uparrow \rightarrow \pi_{сIр} \uparrow, \pi_{сIIр} \uparrow, c_{сI} \uparrow, c_{сII} \uparrow.$$

Однако ни один из рассмотренных методов анализа не дает однозначного ответа на вопрос об изменении удельных параметров и тяги двигателя, так как изменяющиеся величины оказывают на них противоположное влияние. Поэтому нужно обратиться к анализу параметров двигателя методом работы цикла. В [1, разд. 7.4.1] показано, что с увеличением $V_{п}$ удельная тяга снижается, а удельный расход топлива увеличивается, и объяснены причины такого их изменения. *Тяга двигателя имеет сложный характер изменения.* Вначале (при увеличении $V_{п}$ от 0 до 300...500 км/ч) она обычно снижается, затем изменяется незначительно, так как противоположные изменения удельной тяги и расхода воздуха в значительной степени компенсируют друг друга. Далее (главным образом на сверхзвуковых скоростях) она обычно увеличивается из-за преобладающего влияния роста расхода воздуха. Наконец, достигнув максимума (на больших сверхзвуковых скоростях), она снижается до нуля при предельной скорости полета $V_{п,пр}$, так как на этой скорости удельная тяга равна нулю (все подведенное тепло идет на преодоление гидравлических потерь).

Таким образом, параметры двигателя и его основные данные значительно зависят от скорости полета при ее изменении от нуля до предельного значения (см. рис. 5.4).

5.3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Перед началом лабораторной работы преподаватель проверяет знание студентом теоретических основ, необходимых для последующего анализа результатов. Изучение этих основ обеспечивается в процессе посещения лекций, а также самостоятельного изучения студентами соответствующих разделов учебника [2] и данного лабораторного практикума. Необходимо также подготовиться к ответам на контрольные вопросы по 12 главе учебника [2].

После допуска к лабораторной работе каждому студенту выдается бланк индивидуального задания в печатном виде, который является также титульным листом отчета.

Объектом исследования является двухвальный ТРДД с раздельным истечением потоков. В задании указываются следующие исходные данные, необходимые для проектного расчета (завязки) при $H_n=0$, $M_n=0$:

- температура газа перед турбиной T_T^* ;
- степень повышения давления в компрессоре низкого давления $\pi_{кнд}^*$;
- степень повышения давления в компрессоре высокого давления $\pi_{квд}^*$;
- степень двухконтурности m ;
- степень повышения давления в вентиляторе наружного контура $\pi_{вп}^*$;
- тяга двигателя P .

Значения остальных исходных данных (значения КПД узлов, коэффициентов потерь и пр.) принимаются по умолчанию, и их ввод не требуется.

Исходные данные расчета выполненного двигателя (площади сечений, КПД узлов, коэффициенты потерь и пр.) формируются автоматически.

Расчетный эксперимент выполняется студентами самостоятельно в автоматизированной системе термогазодинамического расчета и анализа АСТРА с помощью специально сформированной математической модели ГТД.

После запуска автоматизированной системы АСТРА в главном окне необходимо нажать кнопку «Открыть модель» (рис. 5.5).

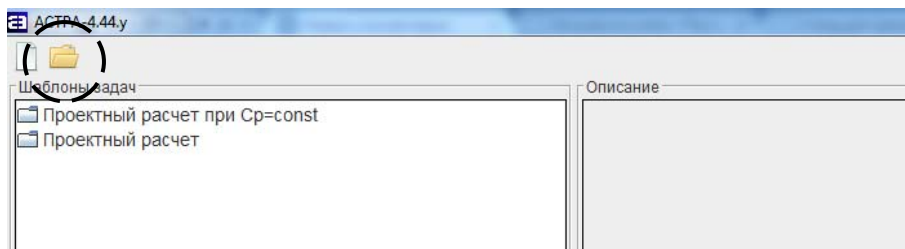


Рис. 5.5. Внешний вид главного окна после запуска системы

Далее необходимо выбирать специально созданную для проведения лабораторной работы модель ГТД, которая называется «ЛР_глава12.mdl.xml» (рис. 5.6). Более подробно об основах формирования математических моделей в САЕ системе АСТРА написано в [3].

После открытия модели ГТД необходимо выделить в дереве структуры модели элемент «Завязка» и в соответствии с заданием внести свои исходные данные для проектного расчета (завязки) (рис. 5.7).

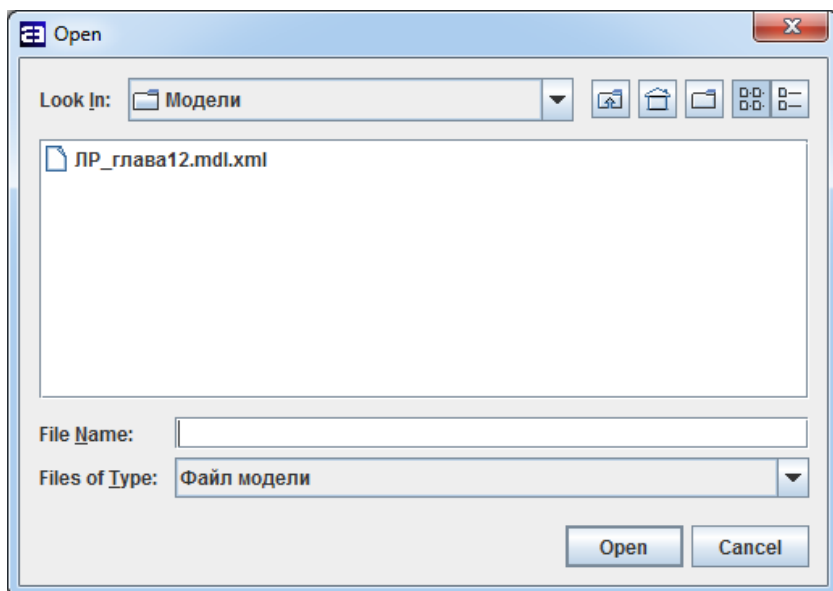


Рис. 5.6. Окно выбора модели для загрузки

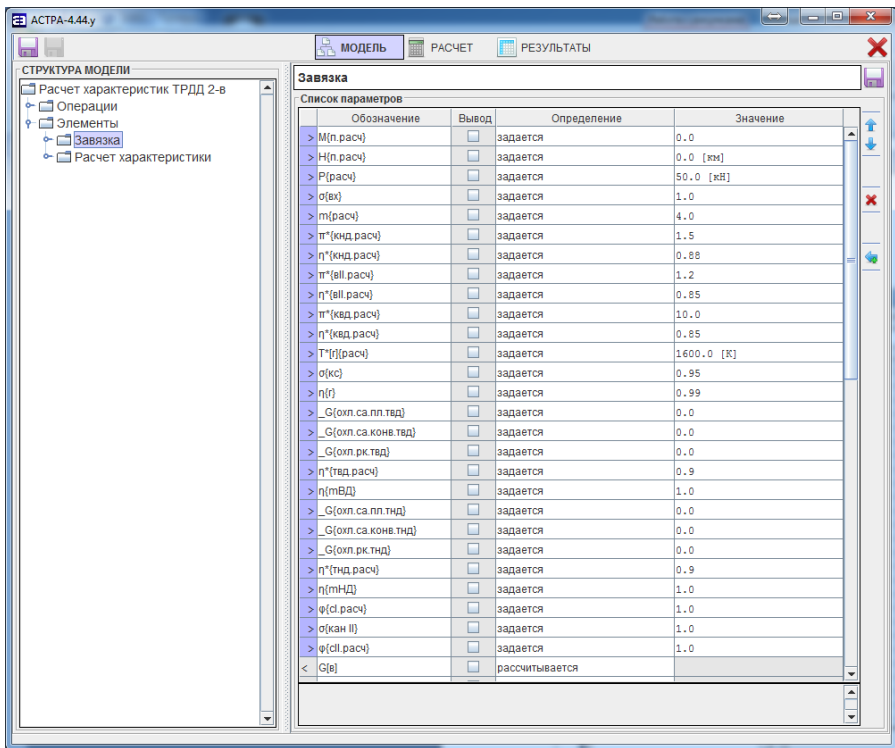


Рис. 5.7. Ввод исходных данных для завязки двигателя

После ввода исходных данных для завязки двигателя необходимо ввести исходные данные для расчета характеристик. Для этого необходимо выбрать в дереве структуры элемент «Расчет характеристики» и внести необходимые для расчета данные.

Расчет климатических характеристик необходимо выполнить при двух вариантах закона регулирования двигателя: $n_{вд} = \text{const}$ и $p_k^* = \text{const}$.

Для расчета климатических характеристик при $n_{вд} = \text{const}$ необходимо задать следующие данные (рис. 5.8):

- скорость полета $M_n = 0$;
- высота полета $H_n = 0$;
- **табулирование** отклонения температуры от стандартной (при указанных M_n и H_n) $\Delta T_n = -30 \dots 30$ К (7 точек);
- отклонение давления от стандартного (при указанных M_n и H_n) $\Delta p_n = 0$ кПа;

- частота вращения ротора $n_{ВД}=100\%$;
- давление за компрессором p_k^* – **рассчитывается**.

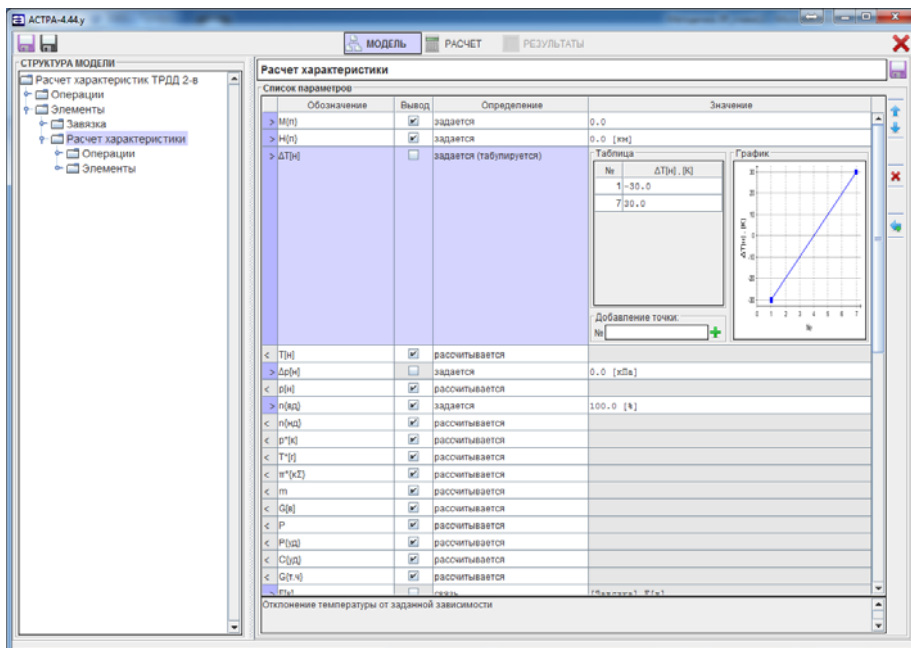


Рис.5.7. Ввод данных для расчета климатической характеристики при $n_{ВД}=100\%$

Для расчета климатических характеристик при $p_k^* = \text{const}$ необходимо задать следующие данные (рис. 5.8):

- скорость полета $M_p = 0$;
- высота полета $H_p = 0$;
- **табулирование** отклонения температуры от стандартной (при указанных M_p и H_p) $\Delta T_n = -30 \dots 30$ К (7 точек);
- отклонение давления от стандартного (при указанных M_p и H_p) $\Delta p_n = 0$ кПа;
- частота вращения ротора $n_{ВД}$ – **рассчитывается**;
- давление за компрессором p_k^* – **задается** (вводится значение, полученное в результате расчета климатической характеристики при $n_{ВД}=100\%$ и при $T_n=288,15$ К ($\Delta T_n = 0$ К)).

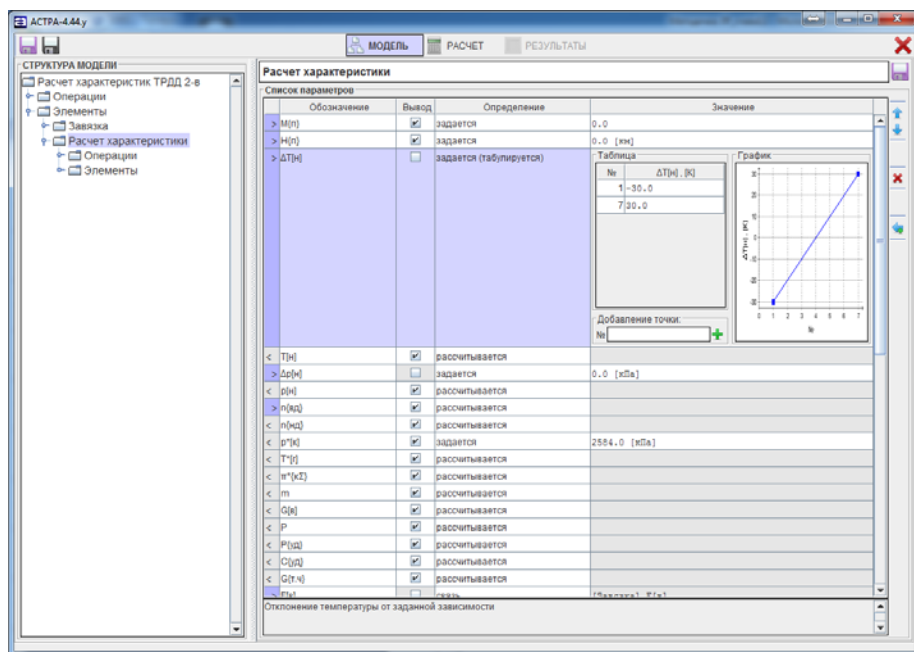


Рис. 5.8. Ввод данных для расчета климатической характеристики при $p_k^* = \text{const}$

Расчет скоростных характеристик необходимо выполнить при двух вариантах закона регулирования двигателя: $n_{ВД} = \text{const}$ и $n_{НД} = \text{const}$.

Для расчета скоростных характеристик при $n_{ВД} = \text{const}$ необходимо задать следующие данные (рис. 5.9):

- **табулирование** скорости полета $M_n = 0,5 \dots 2$ (7 точек);
- высота полета $H_n = 11$ км;
- отклонение температуры от стандартной (при указанных M_n и H_n) $\Delta T_n = 0$ К;
- отклонение давления от стандартного (при указанных M_n и H_n) $\Delta p_n = 0$ кПа;
- частота вращения ротора $n_{ВД} = 90\%$;
- частота вращения ротора $n_{НД}$ – **рассчитывается**;
- давление за компрессором p_k^* – **рассчитывается**.

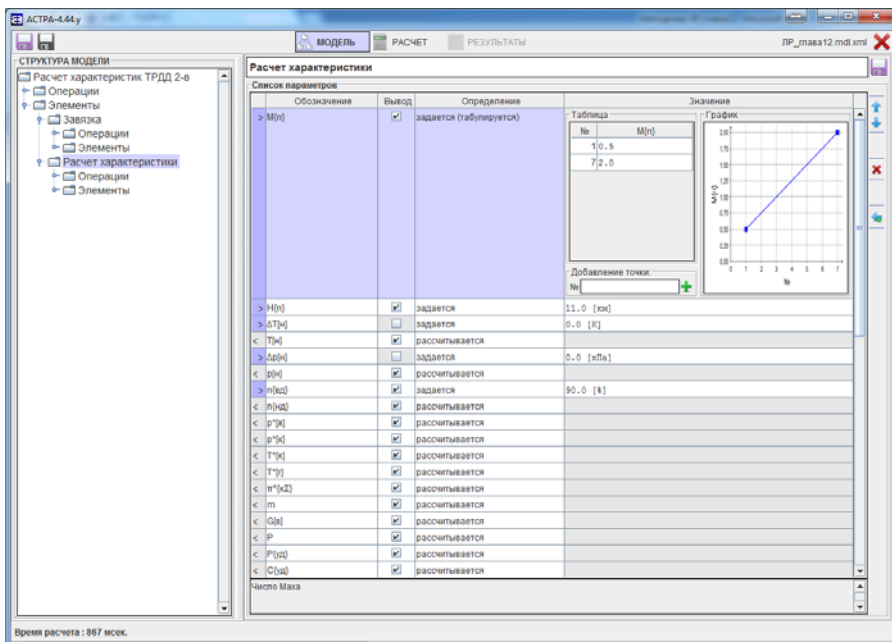


Рис. 5.9. Ввод данных для расчета скоростной характеристики при $n_{ВД}=90\%$

Для расчета скоростных характеристик при $n_{НД}=\text{const}$ необходимо задать следующие данные (рис. 5.10):

- **табулирование** скорости полета $M_{п} = 0,5...2$ (7 точек);
- высота полета $H_{п}=11$ км;
- отклонение температуры от стандартной (при указанных $M_{п}$ и $H_{п}$) $\Delta T_{п}=0$ К;
- отклонение давления от стандартного (при указанных $M_{п}$ и $H_{п}$) $\Delta p_{п}=0$ кПа;
- частота вращения ротора $n_{ВД}$ – **рассчитывается**;
- частота вращения ротора $n_{НД} = 90\%$;
- давление за компрессором $p_{к}^*$ – **рассчитывается**.

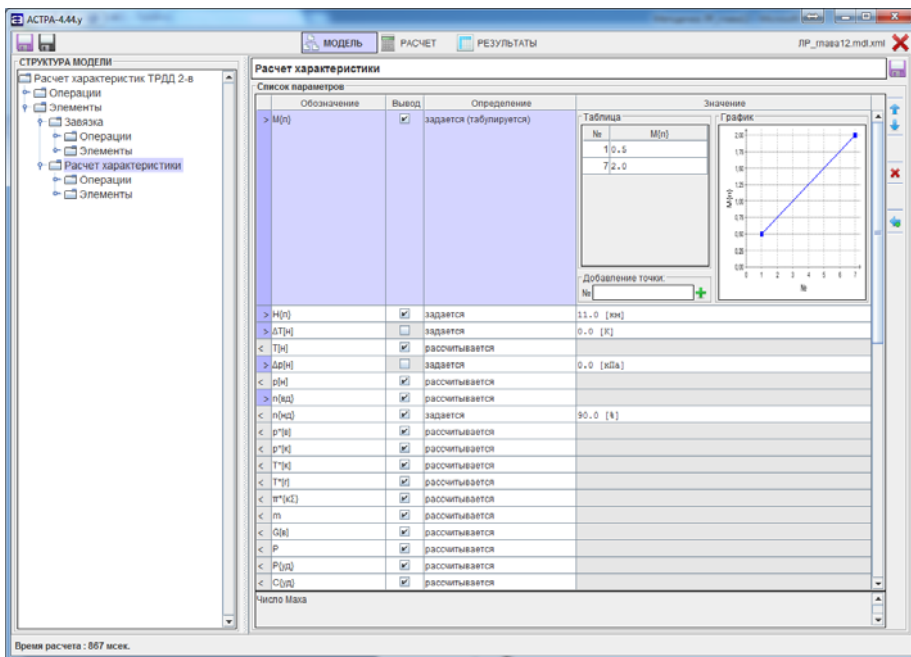


Рис. 5.10. Ввод данных для расчета скоростной характеристики при $n_{HD}=90\%$

Полученные результаты необходимо скопировать в файл отчета в соответствующие таблицы. Графики на листах отчета будут построены по внесенным данным автоматически, необходимо проверить их соответствие теоретическим зависимостям, а затем получить разрешение на печать отчета.

После этого необходимо провести письменный анализ полученных результатов на основе методов, приведенных в разделе 5.2, выбрать и обосновать наиболее рациональный закон управления двигателем, а также сделать соответствующие выводы по указанным выше (раздел 5.1) задачам.

Распечатанные листы отчета сшиваются с бланком задания, который помещается в качестве первой страницы.

В заключение необходимо подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

5.4 СДАЧА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

В процессе сдачи лабораторной работы необходимо обосновать сделанные выводы, ответить на заданные преподавателем 2-3 вопроса из указанного списка. Эти ответы нужно будет приложить в конце отчета по лабораторной работе.

Лабораторная работа сдается преподавателю в распечатанном виде, электронная версия формируется студентом по образцу.

5.4.1 Контрольные вопросы

1. Чем отличается расчет характеристик выполненного двигателя от проектного термогазодинамического расчета? Какие существуют методы расчета характеристик? Что общего в этих методах и в чем их различие?

2. Изложите первый вариант приближенного метода расчета характеристик одновального ТРД.

3. Изложите второй вариант приближенного метода расчета характеристик одновального ТРД.

4. Особенности расчета характеристик двухвальных ТРДД и ТРД. Составьте методику и изложите последовательность расчета характеристик двухвального ТРДД с раздельным истечением потоков.

5. Составьте методику и изложите последовательность расчета характеристик двухвального ТРДД со смешением потоков.

6. Какие методы анализа характеристик двигателя Вы знаете? Изложите их последовательность.

7. Дроссельные характеристики турбореактивного двигателя.

8. Климатические характеристики двигателя. Как изменяются параметры ТРДД в зависимости от давления наружного контура при $n_{ВД} = \text{const}$?

9. Климатические характеристики двигателя. Проанализируйте А-методом зависимость параметров двухвального ТРДД от температуры наружного воздуха при $n_{ВД} (T_r^*) = \text{const}$.

10. Климатические характеристики двигателя. Проанализируйте Б-методом зависимость параметров двухвального ТРДД от температуры наружного воздуха при $n_{ВД} (T_r^*) = \text{const}$.

11. По какому закону нужно управлять турбореактивным двигателем, чтобы обеспечить заданную тягу на максимальном режиме при $H = 0$, $M_n = 0$, $p_n = 101325$ Па и различных температурах наружного воздуха?

12. Высотные характеристики турбореактивного двигателя.

13. Как зависят параметры турбореактивного двигателя от скорости полета при работе двигателя на постоянном режиме?

14. Как различаются скоростные характеристики двухвального ТРД(Д), управляемого по различным законам: $T_r^* = \text{const}$, $n_{ВД} = \text{const}$, $n_{НД} = \text{const}$?

Лабораторная работа 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЛОЩАДЕЙ СОПЛА И СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБИНЫ НА СОВМЕСТНУЮ РАБОТУ УЗЛОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОВАЛЬНОГО И ДВУХВАЛЬНОГО ТРД С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АСТРА

6.1 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Целью лабораторной работы является закрепление и углубление теоретических знаний, полученных в рамках изучения раздела курса лекций «Особенности ТРД(Д) с изменяемыми площадями характерных сечений» [2, гл. 13], развитие навыков анализа результатов численного эксперимента.

Задачи лабораторной работы

1. Расчет и анализ влияния площади сопла на положение линии совместной работы в системе одновального ТРД и на его обобщенные характеристики.

2. Расчет и анализ влияния площади сопла на положение линий совместной работы на характеристиках каскадов компрессора ВД и НД в системе двухвального ТРД.

3. Расчет и анализ влияния площади соплового аппарата турбины НД в системе двухвального ТРД на положение линий совместной работы на характеристиках каскадов компрессора ВД и НД.

4. Сравнительный анализ влияния площади сечения $F_{с.кр}$ на положение линии совместной работы на характеристике компрессора ВД в системе двухвального ТРД и линии совместной работы на характеристике компрессора в системе одновального ТРД.

5. Сравнительный анализ влияния площади сечения $F_{с.кр}$ на положение линии совместной работы на характеристике компрессора НД в системе двухвального ТРД и линии совместной работы на характеристике компрессора в системе одновального ТРД.

6. Сравнительный анализ влияния площадей сечений $F_{с.кр}$ и $F_{с.а.НД}$ на положение линии совместной работы на характеристике компрессора ВД в системе двухвального ТРД.

7. Сравнительный анализ влияния площадей сечений $F_{с.кр}$ и $F_{с.а.НД}$ на положение линии совместной работы на характеристике компрессора НД в системе двухвального ТРД.

Основное внимание при выполнении лабораторной работы должно быть уделено анализу результатов и выводам.

6.2 СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЗЛОВ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И УПРАВЛЕНИЕ ТРД С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПЛОЩАДЯМИ СОПЛА И СОПЛОВОГО АППАРАТА

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

Влияние $F_{с.кр}$ на положение линии совместной работы. Совместная работа турбины и сопла с регулируемым минимальным сечением рассматривалась в [2, разд. 10.2], где показано, 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 $l_k = \frac{T_r^*}{T_b^*} l_t B$ следует, что с увеличением π_t^* при $T_r^* = const$ возрастает степень повышения давления компрессора π_k^* , так как увеличенному значению работы турбины соответствует увеличенное значение работы компрессора.

Согласно условию неразрывности $q(\lambda_b) = \frac{\pi_k^*}{\sqrt{T_r^*/T_b^*}} A$ повышению π_k^*

должно соответствовать увеличенное значение $q(\lambda_b)$ так как расход воздуха через минимальное сечение соплового аппарата турбины изменяется при принятом условии ($T_r^* = const$) 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 (рис. 6.1). 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 $\pi_T^* (F_{с.кр})$ легко установить также из уравнения

$$q(\lambda_{вД}) = \frac{P_{кВД}^*}{\sqrt{I_{кВД}}} A \sqrt{I_{тВД}} B \text{ при } q(\lambda_{в}) = \text{const.}$$

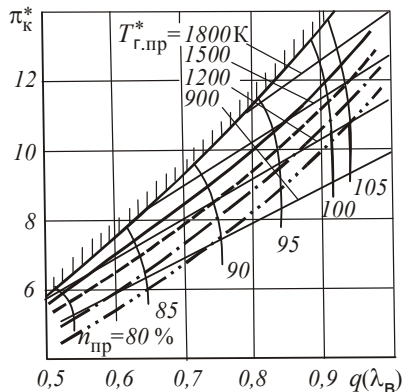


Рис. 6.1. Влияние площади сопла $F_{с.кр}$ на положение линии совместной работы на характеристике компрессора одновального ТРД:

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

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

Обобщенные характеристики одновального ТРД с $F_{с.кр} = \text{var}$.

При $T_{г}^* = \text{const}$ с возрастанием площади $F_{с.кр}$ температура газа за турбиной одновального ТРД снижается вследствие увеличения работы L_T , степень расширения газа в канале сопла $\pi_{с.р}$ обычно повышается, так как увеличению π_T^* соответствует более значительный рост $\pi_{к}^*$. Удельная тяга в большинстве случаев изменяется незначительно (рис. 6.2, а) в связи с тем, что влияние определяющих ее величин $T_{г}^*$ и $\pi_{с.р}$ частично компенсируется.

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

Изменение удельной тяги и удельного расхода топлива в большой степени определяется изменением КПД компрессора и турбины, а также коэффициента скорости сопла. С увеличением $F_{с.кр}$ КПД компрессора чаще всего снижается (особенно при высоких $n_{пр}$), при значительном увеличении $F_{с.кр}$ 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 $F_{с.кр}$ при $T_{г}^ = \text{const}$ возрастает в зоне средних значений $n_{пр}$ благодаря повышению расхода воздуха. При больших $n_{пр}$ тяга обычно уменьшается, так как величина $G_{в}$ изменяется незначительно, а $P_{уд}$ уменьшается вследствие снижения $\eta_{к}^*$.*

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 $n = \text{const}$ ($G_{в} \approx \text{const}$). 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 $p_{к}^*$ 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 $\pi_{к}^*$ и $T_{г}^*$ соответственно. В результате $\Delta K_{у}$ увеличивается, а удельная и полная тяга уменьшаются. Удельный расход топлива обычно снижается главным образом вследствие уменьшения $T_{г}^*$ (рис. 6.2, б).

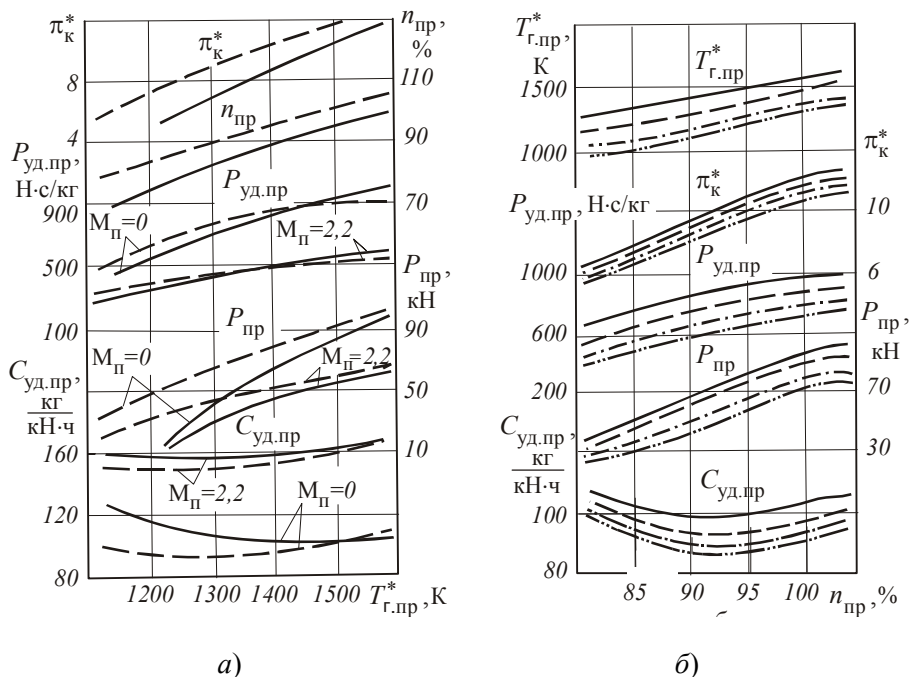


Рис. 6.2. Влияние $F_{с.кр}$ на обобщенные характеристики
 обновального ТРД (обозначения см. рис. 6.1):
 а – $M_n = var$; б – $M_n = 0$

6.2.2 Особенности влияния площади сопла на положение линий совместной работы на характеристиках каскадов компрессора ВД и НД в системе двухвального ТРД

Как следует из анализа совместной работы двухвальной турбины и сопла [2, разд. 10.2], с изменением площади сопла изменяется степень понижения давления в турбине НД. На основных рабочих режимах приведенная скорость в минимальном сечении соплового аппарата $\lambda_{с.аНД}$, а следовательно и пропускная способность турбины НД $\mu_{с.а} q(\lambda_{с.аНД}) F_{с.аНД}$, сохраняются практически неизменными. Вследствие этого незначительно изменяется и $\pi_{тВД}^*$. Таким образом, изменение площади сопла оказывает незначительное влияние или практически не влияет на совместную работу узлов газогенератора и на положение линии совместной работы на характеристике компрессора ВД двухвального ТРД.

Влияние площади сопла на совместную работу узлов турбокомпрессора НД и параметры двухвального ТРД рассмотрим при $T_r^* = \text{const}$.

С увеличением площади сопла степень понижения давления $\pi_{тНД}^*$ и, следовательно, располагаемая работа турбины НД увеличиваются, что ведет к повышению частоты вращения ротора НД. Соответственно увеличиваются $\pi_{кНД}^*$ и $q(\lambda_{в})$ – [2, уравнения (10.9) и (10.10)] – и уменьшается скольжение роторов, что приводит, как показано в [2, разд. 11.1.2], к смещению линии совместной работы на характеристике компрессора НД к границе помпажа и к соответствующему снижению запасов устойчивой работы.

Таким образом, увеличение площади $F_{с,кр}$ в системе двухвального ТРД ведет не к повышению запасов устойчивой работы компрессора, как на одновальном ТРД, а к их уменьшению.

При этом рабочая точка на характеристике компрессора ВД незначительно смещается по линии совместной работы влево вниз вследствие увеличения температуры $T_{вВД}^*$ перед этим компрессором, что сопровождается снижением $\pi_{кВД}^*$, $q(\lambda_{вВД})$ и $n_{пр.вВД}$.

6.2.3 Особенности влияния площади соплового аппарата турбины НД на положение линий совместной работы на характеристиках каскадов компрессора ВД и НД

Влияние площади $F_{с,аНД}$ на совместную работу узлов газогенератора и на положение линии совместной работы на характеристике компрессора ВД не отличается от влияния площади сопла на положение линии совместной работы в системе одновального ТРД, которое было рассмотрено в разд. 6.2.1: с увеличением $F_{с,аНД}$ при $T_r^* = \text{const}$ значения $\pi_{тВД}^*$, $\pi_{кВД}^*$, $n_{пр.вВД}$ и $\Delta K_{уВД}$ повышаются.

С изменением площади $F_{с,аНД}$ степень понижения давления в турбинах $\pi_{тВД}^*$ и $\pi_{тНД}^*$ изменяется противоположно: соответственно изменяется работа турбин $L_{тВД}$ и $L_{тНД}$, а следовательно и работа компрессоров $L_{кВД}$ и $L_{кНД}$, что ведет к изменению скольжения роторов $n_{вд} / n_{нд}$. Например, с увеличением $F_{с,аНД}$ при $T_r^* = \text{const}$ скольжение возрастает главным образом вследствие повышения частоты вращения ротора ВД, что сопровождается смещением линии совместной работы на характеристике компрессора НД вниз и увеличением запасов устойчивости $\Delta K_{уНД}$. Таким образом, перераспределяется работа между турбокомпрессорами ВД и НД и повышаются запасы устойчивой работы каскадов компрессора.

При изменении площади $F_{с.аНД}$ суммарная степень понижения давления в турбине не изменяется (если пренебречь изменением η_T^*), так как она определяется величинами $F_{с.аВД}$ и $F_{с.кр}$, которые постоянны по условию. Не изменяется, следовательно, и суммарная работа турбины, а также температура газа за турбиной. Вследствие этого сохраняются неизменными суммарная работа компрессора двухвального ТРД и температура за компрессором. Если КПД компрессоров НД и ВД одинаковы, то не изменится и суммарная степень повышения давления $\pi_{к\Sigma}^*$. В этом случае остаются неизменными все удельные параметры двигателя, расход воздуха и тяга.

В действительности КПД компрессоров НД и ВД обычно неодинаковы, кроме того, с увеличением $F_{с.аНД}$ рабочие точки на характеристиках компрессоров смещаются таким образом, что одновременно с увеличением запасов устойчивой работы, как правило, снижаются КПД компрессоров, особенно в зоне высоких $n_{пр}$. Это приводит к уменьшению $\pi_{к\Sigma}^*$ и, следовательно, расхода воздуха через двигатель. Соответственно уменьшаются степень расширения сопла $\pi_{с,р}$, удельная и полная тяги и увеличивается удельный расход топлива.

6.3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Перед началом лабораторной работы преподаватель проверяет знание студентом теоретических основ, необходимых для последующего анализа результатов. Изучение этих основ обеспечивается в процессе посещения лекций, а также самостоятельного изучения студентами соответствующих разделов учебника [2] и данного лабораторного практикума. Необходимо также подготовиться к ответам на контрольные вопросы по [2, гл. 13].

После допуска к лабораторной работе каждому студенту выдается бланк индивидуального задания в печатном виде, который является также титульным листом отчета.

Объектом исследования являются одновальный ТРД с регулируемой площадью сопла и двухвальный ТРД с регулируемыми площадями сопла и соплового аппарата турбины НД. В задании указываются следующие исходные данные, необходимые для проектного расчета (завязки) при $H_n=0$, $M_n=0$:

- температура газа перед турбиной T_T^* (одинаковая для обоих двигателей);

- степень повышения давления в компрессоре низкого давления $\pi_{кНД}^*$ для двухвального ТРД;
- степень повышения давления в компрессоре высокого давления $\pi_{кВД}^*$ для двухвального ТРД (для одновального ТРД степень повышения давления в компрессоре π_k^* принимается равной $\pi_{кВД}^*$ в двухвальном ТРД);
- расход воздуха G_v (одинаковый для обоих двигателей).

Значения остальных исходных данных (значения КПД узлов, коэффициентов потерь и пр.) принимаются по умолчанию, и их ввод не требуется.

Исходные данные расчета выполненного двигателя (площади сечений, КПД узлов, коэффициенты потерь и пр.) формируются автоматически.

Расчетный эксперимент выполняется студентами самостоятельно в автоматизированной системе термогазодинамического расчета и анализа АСТРА с помощью специально сформированных математических моделей ГТД [3].

Исследование влияния регулирования площади сопла на совместную работу узлов одновального ТРД.

После запуска автоматизированной системы АСТРА в главном окне необходимо нажать кнопку «Открыть модель» (рис. 6.3).

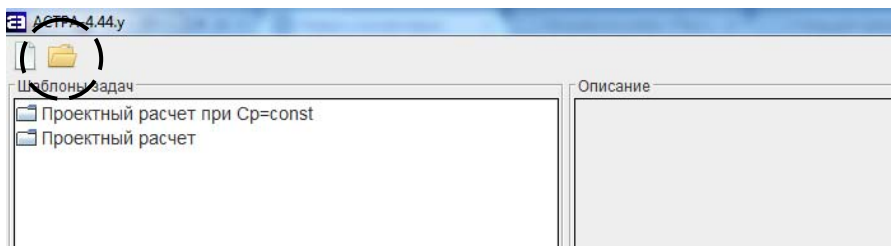


Рис. 6.3. Внешний вид главного окна после запуска системы

Далее необходимо выбрать специально созданную для проведения лабораторной работы модель ГТД, которая называется «хар-ТРД-1v.mdl.xml» (рис. 6.4). Более подробно об основах формирования математических моделей в САЕ-системе АСТРА написано в [3].

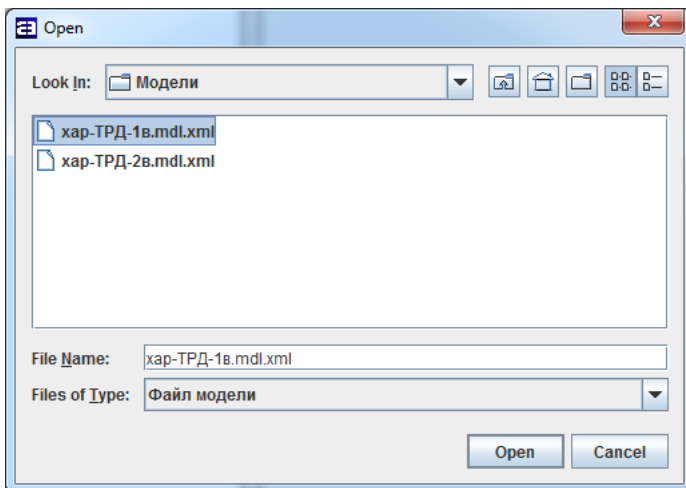


Рис. 6.4. Окно выбора модели для загрузки

После открытия модели ГТД необходимо выделить в дереве структуры модели элемент «Завязка» и в соответствии с заданием внести свои исходные данные для проектного расчета (завязки) (рис. 6.5).

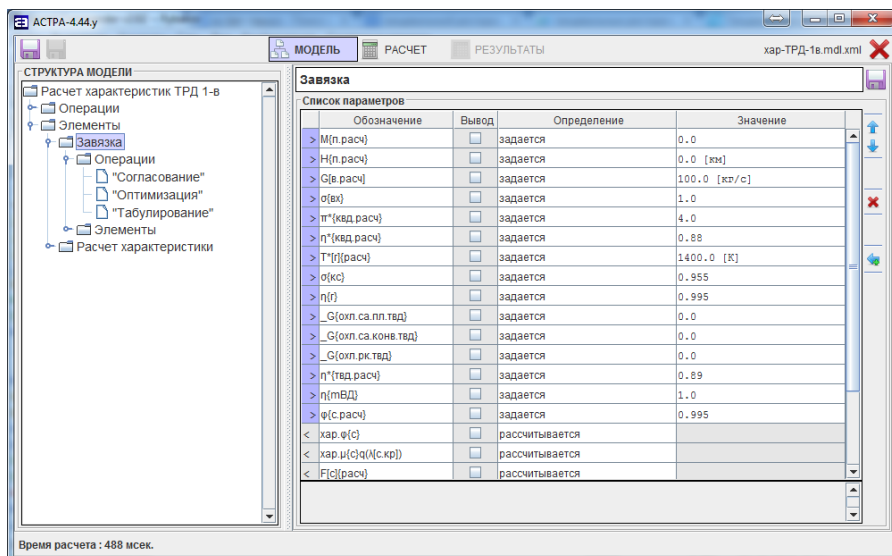


Рис. 6.5. Ввод исходных данных для завязки двигателя

После ввода исходных данных для завязки двигателя необходимо ввести исходные данные для расчета характеристик. Для этого необходимо выбрать в дереве структуры элемент «Расчет характеристики» и внести необходимые для расчета данные.

Для построения дроссельных характеристик и линий совместной работы необходимо последовательно выполнить три расчета с разными значениями площади сопла ($\delta F[c]=0; -10; +10\%$). При этом необходимо задать следующие данные (рис. 6.6):

- скорость полета $M_{п} = 0$;
- высота полета $H_{п}=0$;
- **табулирование** частоты вращения ротора $n_{ВД}=90...105\%$ (4 точки);
- относительное изменение площади выходного сечения сопла $\delta F[c]=0; -10; +10\%$.

Полученные результаты необходимо скопировать в файл отчета в соответствующие таблицы.

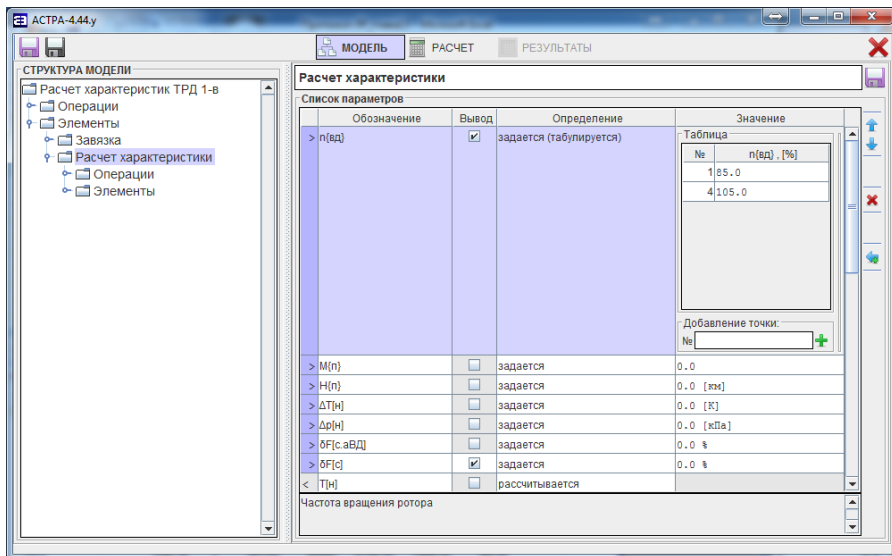


Рис.6.6. Ввод данных для расчета дроссельной характеристики и линии совместной работы одновального ТРД

Исследование влияния регулирования площади сопла и соплового аппарата турбины на совместную работу узлов двухвального ТРД.

После запуска автоматизированной системы АСТРА в главном окне необходимо нажать кнопку «Открыть модель» (см. рис. 6.3).

Далее необходимо выбирать специально созданную для проведения лабораторной работы модель ГТД, которая называется «хар-ТРД-2в.mdl.xml» (рис. 6.7).

После открытия модели ГТД необходимо выделить в дереве структуры модели элемент «Завязка» и в соответствии с заданием внести свои исходные данные для проектного расчета (завязки) (рис. 6.8).

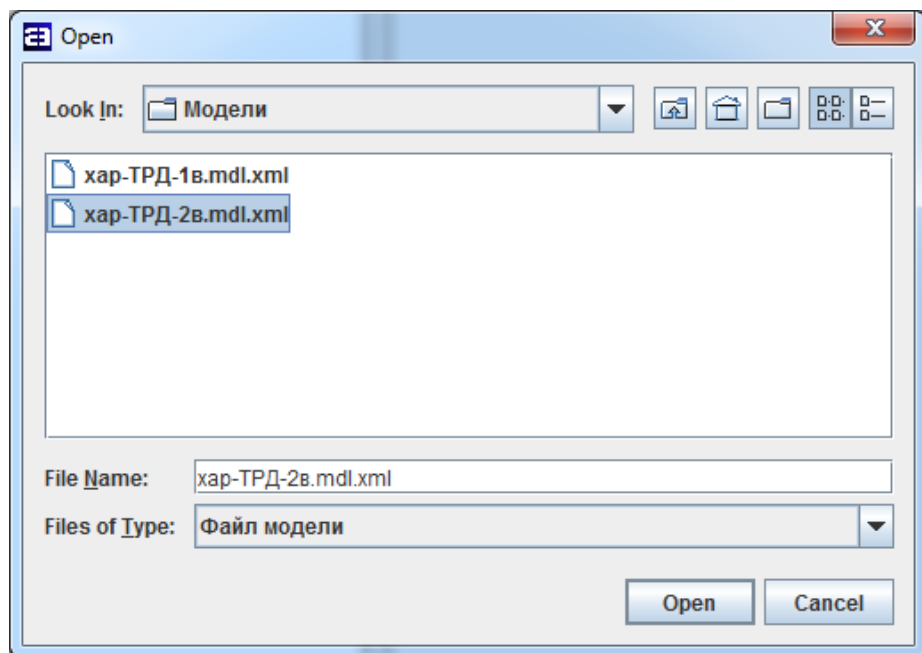


Рис. 6.7. Окно выбора модели для загрузки

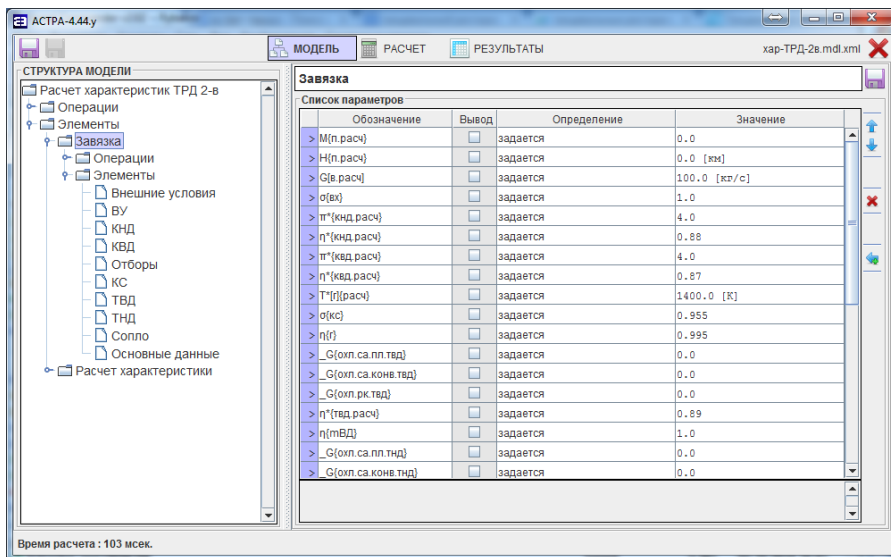


Рис. 6.8. Ввод исходных данных для завязки двигателя

После ввода исходных данных для завязки двигателя необходимо ввести исходные данные для расчета характеристик. Для этого необходимо выбрать в дереве структуры элемент «Расчет характеристики» и внести необходимые для расчета данные.

Для построения дроссельных характеристик и линий совместной работы сначала необходимо последовательно выполнить три расчета с разными значениями площади сопла ($\delta F[c]=0; -10; +10\%$), затем три расчета с разными значениями площади соплового аппарата турбины НД ($\delta F[c.aНД]=0, -10, +10\%$) при $\delta F[c]=0$. При этом необходимо задать следующие данные (рис. 6.9, 6.10):

- скорость полета $M_{п} = 0$;
- высота полета $H_{п}=0$;
- **табулирование** частоты вращения ротора $n_{ВД}=70...100\%$ (4 точки);
- относительное изменение площади выходного сечения сопла $\delta F[c]=0; -10; +10\%$ (и относительное изменение площади соплового аппарата турбины НД $\delta F[c.aНД]=0, -10, +10\%$).

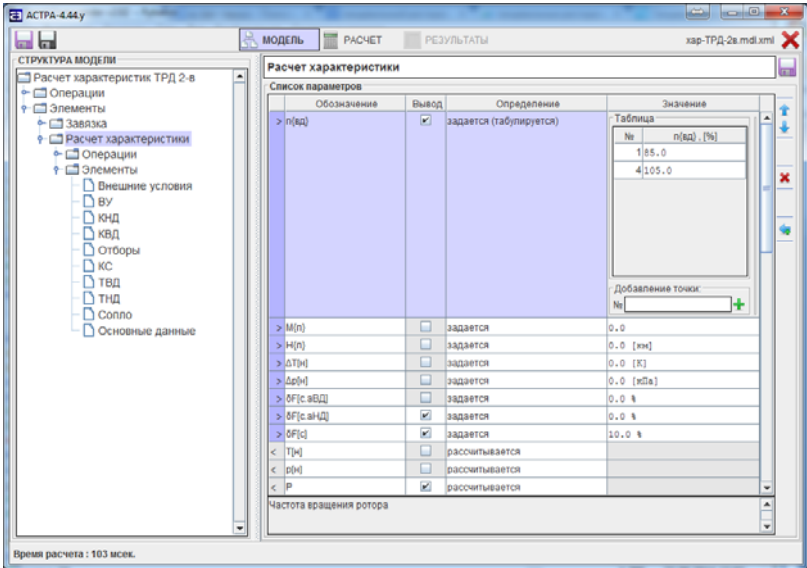


Рис. 6.9. Ввод данных для расчета дроссельной характеристики и линии совместной работы двухвального ТРД

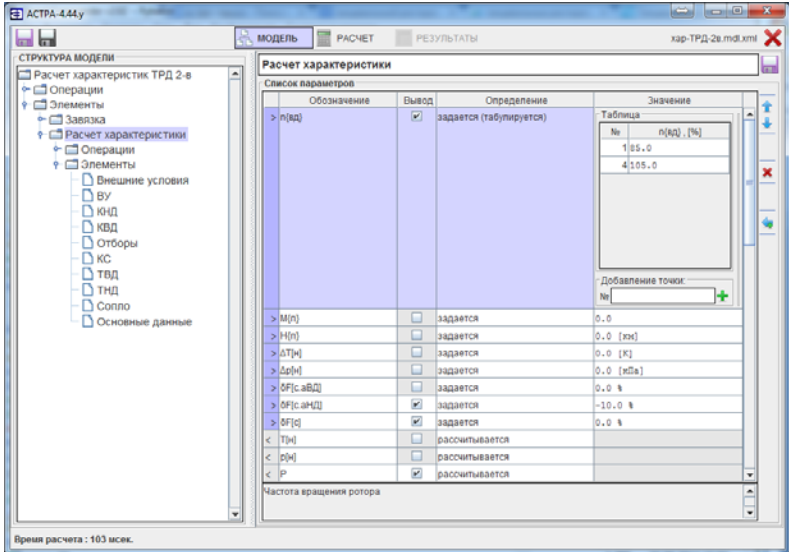


Рис. 6.9. Ввод данных для расчета дроссельной характеристики и линии совместной работы двухвального ТРД

Полученные результаты необходимо скопировать в файл отчета в соответствующие таблицы. Графики на листах отчета будут построены по внесенным данным автоматически. Необходимо проверить их соответствие теоретическим зависимостям, а затем получить разрешение на печать отчета.

После этого необходимо провести письменный анализ полученных результатов расчета и сделать соответствующие выводы по указанным выше (см. раздел 6.1) задачам (задачи 1, 2, 3). Кроме того, необходимо сделать сравнительный анализ полученных выводов согласно поставленным там же четырем задачам (задачи 4, 5, 6, 7)

Распечатанные листы отчета сшиваются с бланком задания, который помещается в качестве первой страницы.

В заключение необходимо подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

6.4 СДАЧА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

В процессе сдачи лабораторной работы необходимо обосновать сделанные выводы, ответить на заданные преподавателем 2-3 вопроса из указанного списка. Эти ответы нужно будет приложить в конце отчета по лабораторной работе.

Лабораторная работа сдается преподавателю в распечатанном виде, электронная версия формируется студентом по образцу.

6.4.1 Контрольные вопросы

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 $n = \text{const}$.

3. Проанализируйте влияние площади соплового аппарата турбины НД в системе двухвального ТРД на положение линий совместной работы на характеристиках каскадов компрессора ВД и НД.

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

5. Проанализируйте влияние площади сопла $F_{с.кр}$ на совместную работу узлов и на характеристики двухвального ТРД при $T_g^* = \text{const}$.

Лабораторная работа 7

АНАЛИЗ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ УЗЛОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОВАЛЬНОГО ТВД И ТВАД СО СВОБОДНОЙ ТУРБИНОЙ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АСТРА

7.1 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Целью лабораторной работы является закрепление и углубление теоретических знаний, полученных в рамках изучения раздела курса лекций «Особенности ТВД, ТВаД и ТРД(Д)Ф» [2, гл. 14], развитие навыков анализа результатов численного эксперимента.

Задачи лабораторной работы

1. Расчет и анализ дроссельной характеристики и линии совместной работы на характеристике компрессора в системе ТВаД со свободной турбиной и одновальным газогенератором.

2. Расчет и анализ дроссельной характеристики и линии совместной работы на характеристике компрессора в системе одновального ТВД при $n = \text{const}$.

3. Расчет дроссельной характеристики и линий совместной работы на характеристике компрессора в системе одновального ТВД с $\eta_{\text{отб}} = \text{idem}$ и $n = \text{var}$.

4. Сравнительный анализ дроссельных характеристик и протекания линий совместной работы на характеристиках компрессоров одновального ТВД и ТВаД с одновальным газогенератором и свободной турбиной.

5. Сравнительный анализ дроссельных характеристик и протекания линий совместной работы на характеристиках компрессоров одновального ТВД с $\eta_{\text{отб}} = \text{idem}$ и с одновального ТРД с $F_c = \text{idem}$ (по результатам лабораторной работы 6).

Основное внимание при выполнении лабораторной работы должно быть уделено анализу результатов и выводам.

7.2 СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЗЛОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБОВАЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ СО СВОБОДНОЙ ТУРБИНОЙ (И ОДНОВАЛЬНЫМ ГАЗОГЕНЕРАТОРОМ) И ОДНОВАЛЬНОГО ТВД

7.2.1 Анализ совместной работы узлов (протекания линии совместной работы) и дроссельных характеристик ТВаД

Как известно [2, разд. 14.1.2] ТВаД со свободной турбиной (рис. 7.1), используемый, например, в качестве силовой установки вертолета, имеет два управляющих фактора (G_T и φ_B).

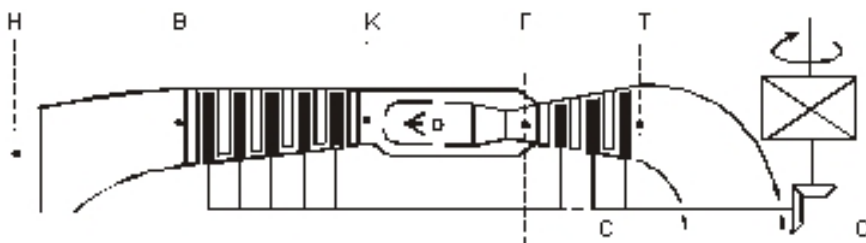


Рис. 7.1. Схема турбовального двигателя со свободной турбиной

Однако второй управляющий фактор (φ_B) практически не оказывает влияния на работу газогенератора, так как ротор турбины винта не имеет механической связи с ротором газогенератора и изменение угла φ_B при $T_T^* = \text{const}$ приводит только к изменению частоты вращения ротора свободной турбины $n_{\text{ТНД}}$ из условия равенства потребной и располагаемой мощностей [2, рис. 14.5]. Поэтому газогенератор ТВаД имеет по существу один управляющий фактор (G_T) и, следовательно, положение рабочей точки на характеристике компрессора, все параметры газогенератора и основные данные турбовального двигателя со свободной турбиной при неизменных внешних условиях практически однозначно определяются одной независимой переменной. Закономерности совместной работы узлов и обобщенные характеристики этого двигателя аналогичны закономерностям совместной работы узлов и характеристикам двигателя с одним управляющим фактором (рис. 7.2, 7.3).

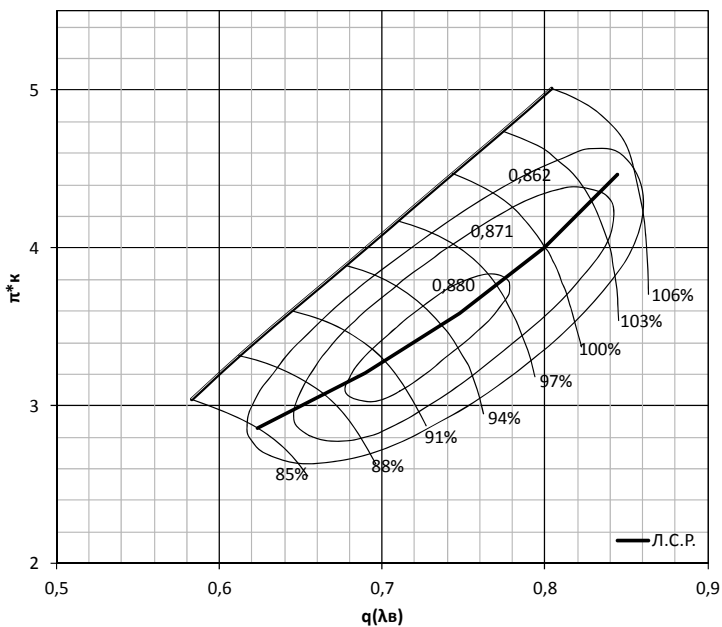


Рис. 7.2. Линия совместной работы на характеристике компрессора ТВаД со свободной турбиной

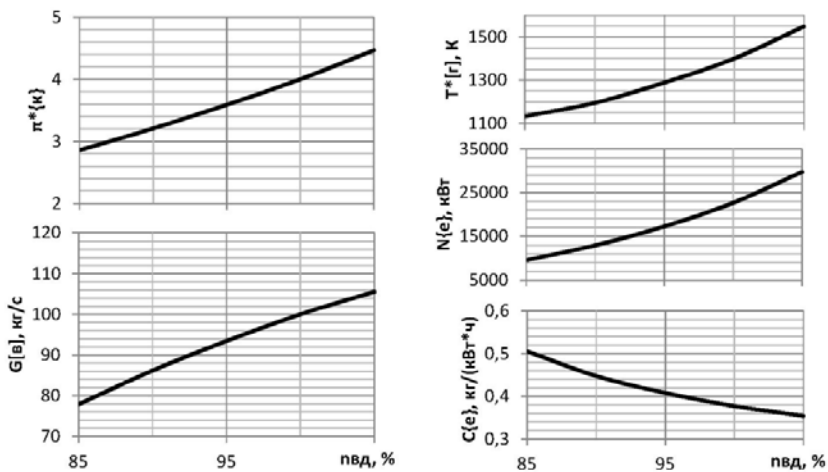


Рис. 7.3. Дроссельные (обобщенные) характеристики ТВаД со свободной турбиной: $M_{п} = 0$, $T_{н}^* = 288\text{K}$, $p_{н}^* = 101325\text{Па}$

7.2.2 Анализ совместной работы узлов (протекания линии совместной работы) и дроссельных характеристик одновального ТВД при $n=const$

Одновальный ТВД с винтом изменяемого шага ($\varphi_b=var$) имеет те же два управляющих фактора (G_T и φ_b) и соответственно два параметра режима, в качестве которых принимают частоту вращения и температуру газа перед турбиной. Проведем физический анализ влияния угла установки винта при $n = const$ на положение рабочей точки на характеристике компрессора и основные данные одновального ТВД. С увеличением φ_b повышается потребляемая мощность винта, а сумма мощностей винта и компрессора становится больше располагаемой мощности турбины. Из условия обеспечения баланса мощности увеличивается расход топлива G_T и соответственно температура газа перед турбиной. Вследствие увеличения степени подогрева газа T_T^* / T_K^* снижается пропускная способность камеры сгорания [2, (10.3)] и повышается давление p_K^* , т.е. степень повышения давления в компрессоре π_K^* [2, (10.4)]. Рабочая точка на характеристике смещается к границе помпажа, снижаются запасы устойчивой работы компрессора. Увеличение суммарной степени повышения давления в двигателе ведет к увеличению π_T^* и $\pi_{с.р.}$. Работа и мощность турбины увеличиваются благодаря повышению не только T_T^* , но и π_T^* . Удельный расход топлива ТВД снижается, так как увеличение T_T^* и π_K^* приводит к повышению эффективного КПД двигателя. Таким образом, закономерности совместной работы узлов одновального ТВД с винтом изменяемого шага принципиально отличаются от закономерностей совместной работы узлов ТВД со свободной турбиной.

7.2.3 Особенности работы двигателя с двумя управляющими факторами. Сравнение одновального ТВД ($\varphi_b=var$) с одновальным ТРД ($F_{с.кр}=var$)

Работа одновального ТВД с винтом изменяемого шага аналогична работе одновального ТРД с регулируемым соплом $F_{с.кр} = var$ [2, разд. 13.1.1 и 14.1.1]). В общем случае (без учета законов регулирования) аналогично протекают и линии совместной работы на характеристиках

компрессоров этих двигателей (рис. 7.4 и 7.6). Дроссельные характеристики рассматриваемых двигателей также аналогичны (рис. 7.5 и 7.7).

Сказанное относится и к системам управления этих двигателей: в обоих случаях имеется два управляющих фактора и соответственно два регулятора.

Однако закономерности совместной работы узлов одновального ТВД с винтом изменяемого шага и соответственно расположение линий совместной работы на характеристике его компрессора отличаются как от закономерностей, присущих турбовальному двигателю со свободной турбиной, так и от закономерностей, присущих одновальному ТРД с регулируемым соплом.

Суть в том, что на одновальном ТРД на крейсерских режимах длительной работы площадь сопла регулируется из условия обеспечения минимального расхода топлива (определяются оптимальные сочетания между снижением температуры газа T_r^* и частоты вращения, обеспечивающие $C_{уд.мин}$ [2, разд. 13.1.3 и разд. 6.2.2].

На одновальном ТВД наибольшее распространение получили законы регулирования, при которых частота вращения ротора сохраняется постоянной на всех режимах $n = const$ для обеспечения хорошей приемистости двигателя [2, разд. 14.2.1]. В результате линии совместной работы протекают по линиям частоты вращения ротора. Другими словами, снижение режима работы одновального ТВД ведет к смещению рабочей точки на линии совместной работы вправо-вниз при $n_{пр} = n \sqrt{288/T_n^*}$ (рис. 7.8), тогда как практически на всех других двигателях рабочая точка на характеристике компрессора смещается при этом влево-вниз.

Дроссельные характеристики одновального ТВД заметно отличаются от дроссельных характеристик ТВД со свободной турбиной: рабочие точки на характеристиках компрессоров перемещаются в разные стороны. Соответственно при уменьшении мощности в системе одновального ТВД расход воздуха не снижается, а даже незначительно увеличивается (рис. 7.9). Основные данные двигателя изменяются в обоих случаях качественно одинаково: при снижении мощности удельный расход топлива монотонно увеличивается, что объясняется снижением эффективного КПД.

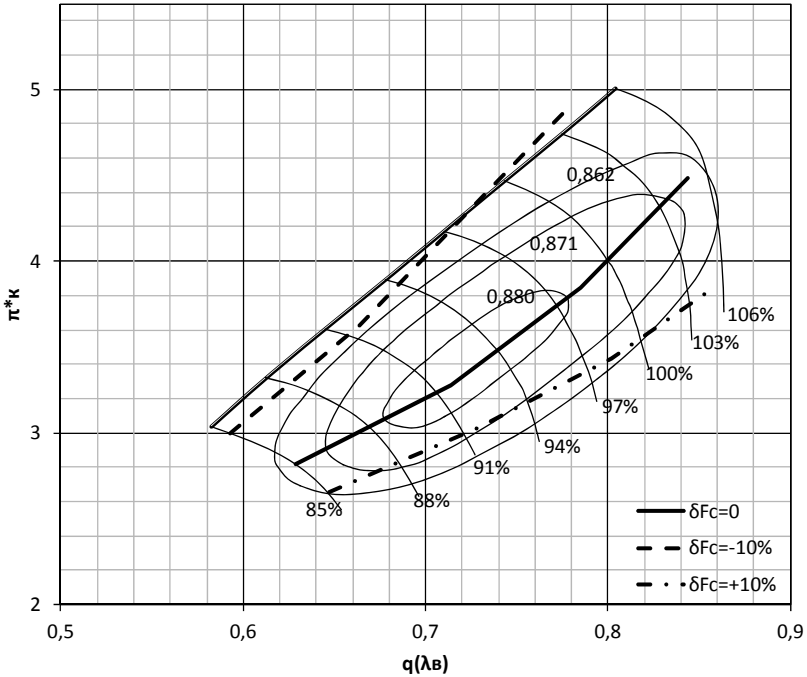


Рис. 7.4. Линии совместной работы узлов одновального ТРД с $F_{c,кр} = \text{var}$

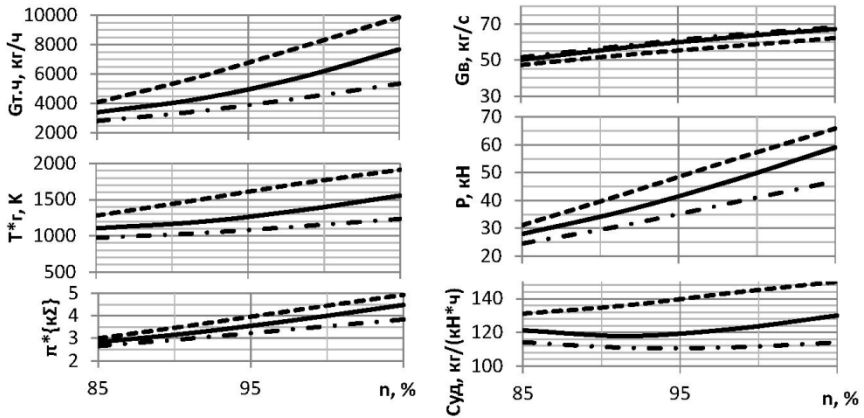


Рис. 7.5. Дроссельные характеристики одновального ТРД с $F_{c,кр} = \text{var}$:
 — $\delta F_{c,кр} = 0$; --- $\delta F_{c,кр} = -10\%$; -·- $\delta F_{c,кр} = +10\%$

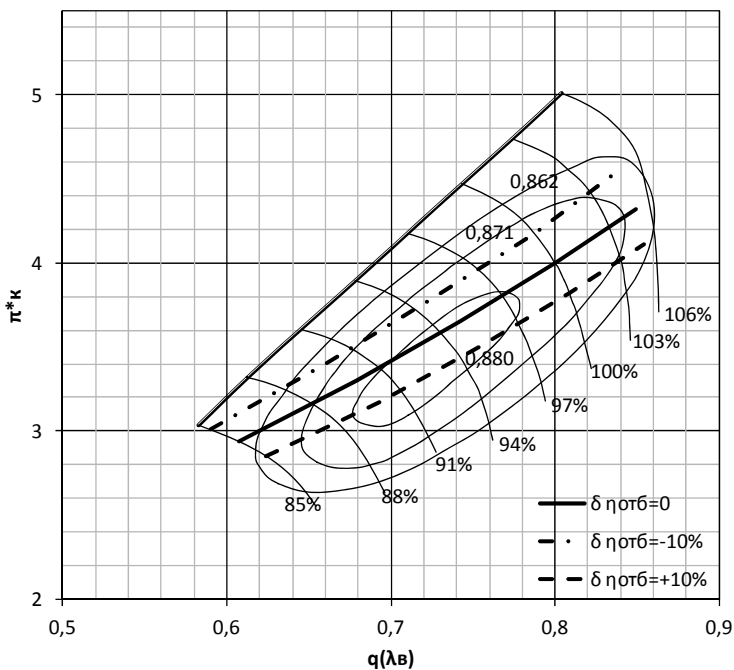


Рис. 7.6. Линии совместной работы узлов одновального ТВД с $\varphi_{в}=\text{var}$

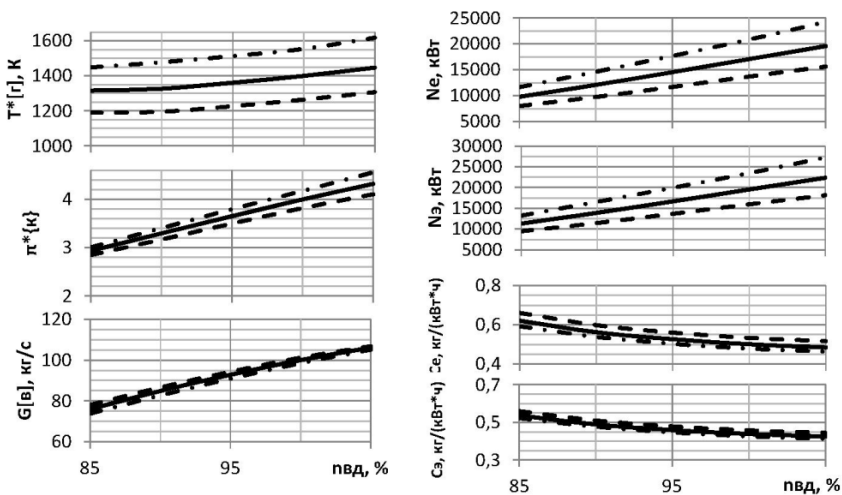


Рис. 7.7. Дроссельные характеристики одновального ТВД с $\varphi_{в}=\text{var}$:
 — $\delta \eta_{отб} = 0$; \cdots $\delta \eta_{отб} = -10\%$; $-\cdots-$ $\delta \eta_{отб} = +10\%$

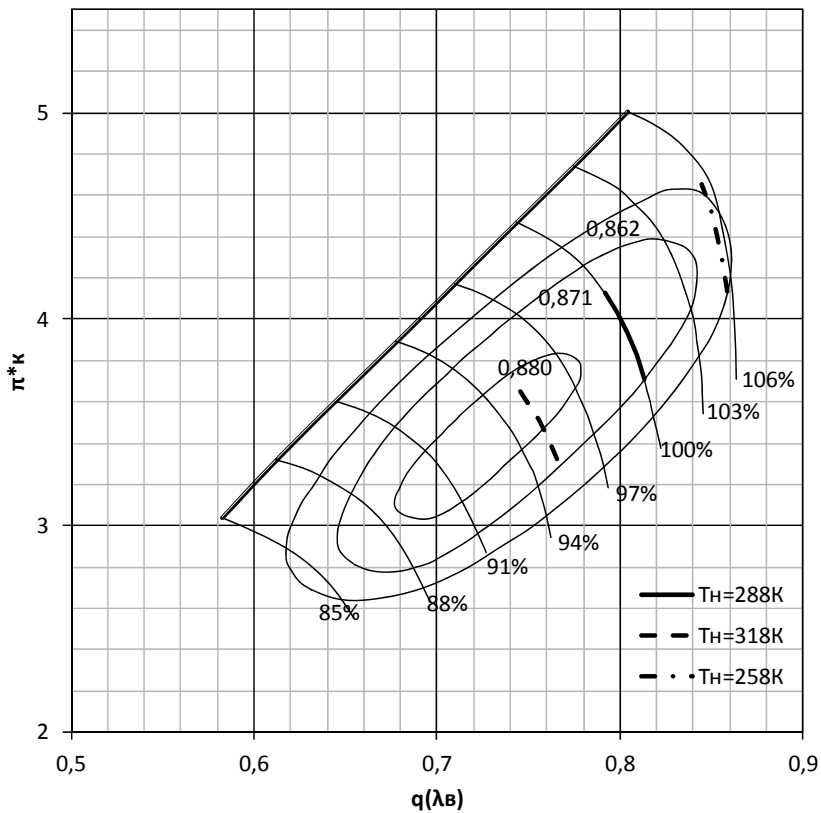


Рис. 7.8. Линии совместной работы на характеристике компрессора ТВД

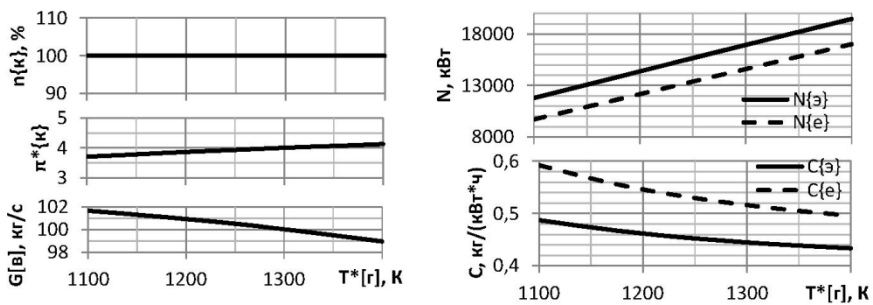


Рис. 7.9. Дроссельные (обобщенные) характеристики ТВД $n=\text{const}$:
 $M_{\text{н}} = 0$, $T_{\text{н}}^* = 288\text{K}$, $p_{\text{н}}^* = 101325\text{Па}$

7.3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Перед началом лабораторной работы преподаватель проверяет знание студентом теоретических основ, необходимых для последующего анализа результатов. Изучение этих основ обеспечивается в процессе посещения лекций, а также самостоятельного изучения студентами соответствующих разделов учебника [2] и данного лабораторного практикума. Необходимо также подготовиться к ответам на контрольные вопросы по учебнику [2, гл. 14].

После допуска к лабораторной работе каждому студенту выдается бланк индивидуального задания в печатном виде, который является также титульным листом отчета.

Объектом исследования являются одновальный ТВаД со свободной турбиной и одновальным газогенератором и одновальный ТВД. В задании указываются следующие исходные данные, необходимые для проектного расчета (завязки) при $H_{\text{п}}=0$, $M_{\text{п}}=0$:

- температура газа перед турбиной $T_{\text{г}}^*$ (одинаковая для обоих двигателей);
- степень повышения давления в компрессоре $\pi_{\text{к}}^*$ (одинаковая для обоих двигателей);
- расход воздуха $G_{\text{в}}$ (одинаковый для обоих двигателей).

Значения остальных исходных данных (значения КПД узлов, коэффициентов потерь и пр.) принимаются по умолчанию, и их ввод не требуется.

Исходные данные расчета выполненного двигателя (площади сечений, КПД узлов, коэффициенты потерь и пр.) формируются автоматически.

Расчетный эксперимент выполняется студентами самостоятельно в автоматизированной системе термогазодинамического расчета и анализа АСТРА с помощью специально сформированных математических моделей ГТД [3].

Расчет дроссельной характеристики и линии совместной работы для ТВаД со свободной турбиной и одновальным газогенератором.

После запуска автоматизированной системы АСТРА в главном окне необходимо нажать кнопку «Открыть модель» (рис. 7.10).

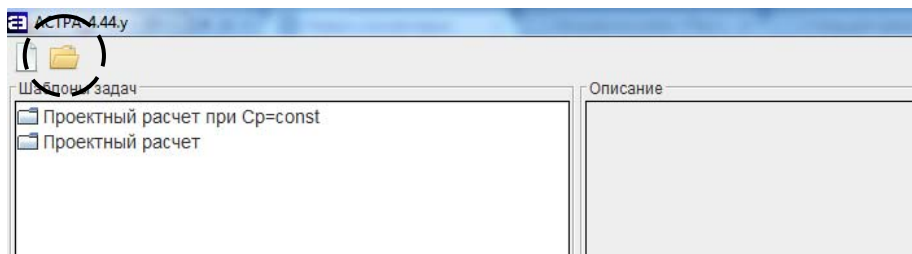


Рис. 7.10. Внешний вид главного окна после запуска системы

Далее необходимо выбрать специально созданную для проведения лабораторной работы модель ГТД, которая называется «хар-ТВаД-2в.mdl.xml» (рис. 7.11). Более подробно об основах формирования математических моделей в САЕ-системе АСТРА написано в [3].

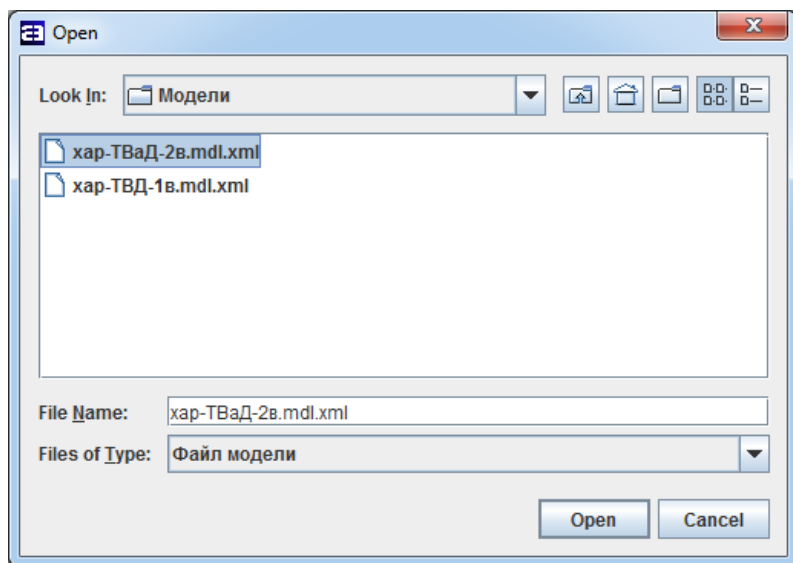


Рис. 7.11. Окно выбора модели для загрузки

После открытия модели ГТД необходимо выделить в дереве структуры модели элемент «Завязка» и в соответствии с заданием внести свои исходные данные для проектного расчета (завязки) (рис. 7.12).

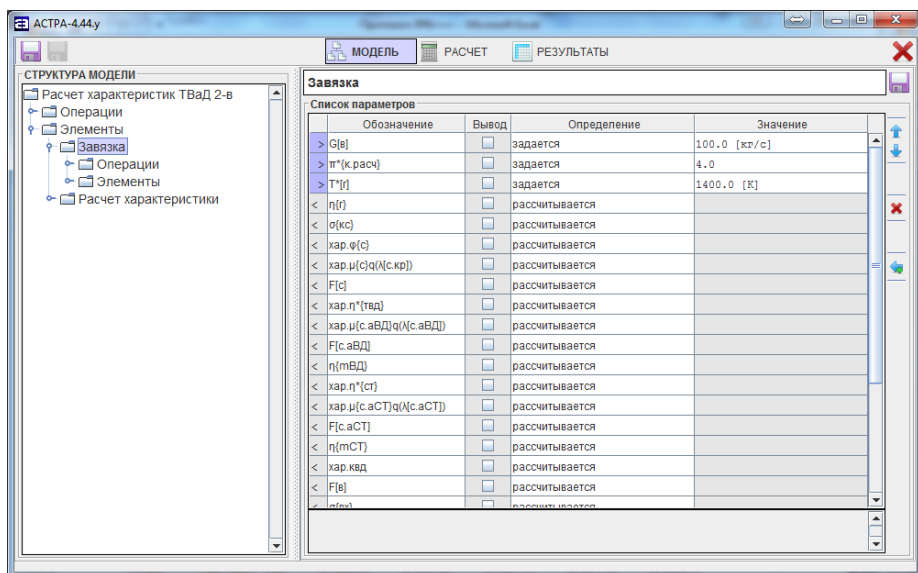


Рис. 7.12. Ввод исходных данных для завязки двигателя

После ввода исходных данных для завязки двигателя необходимо ввести исходные данные для расчета дроссельной характеристики и линии совместной работы. Для этого необходимо выбрать в дереве структуры элемент «Расчет характеристики» и внести необходимые для расчета данные.

Для расчета дроссельной характеристики и построения линии совместной работы необходимо задать следующие данные (рис. 7.13):

- скорость полета $M_{п} = 0$;
- высота полета $H_{п}=0$;
- **табулирование** частоты вращения ротора $n_{вд}=85...105\%$ (5 точек).

Полученные результаты необходимо скопировать в файл отчета в соответствующие таблицы.

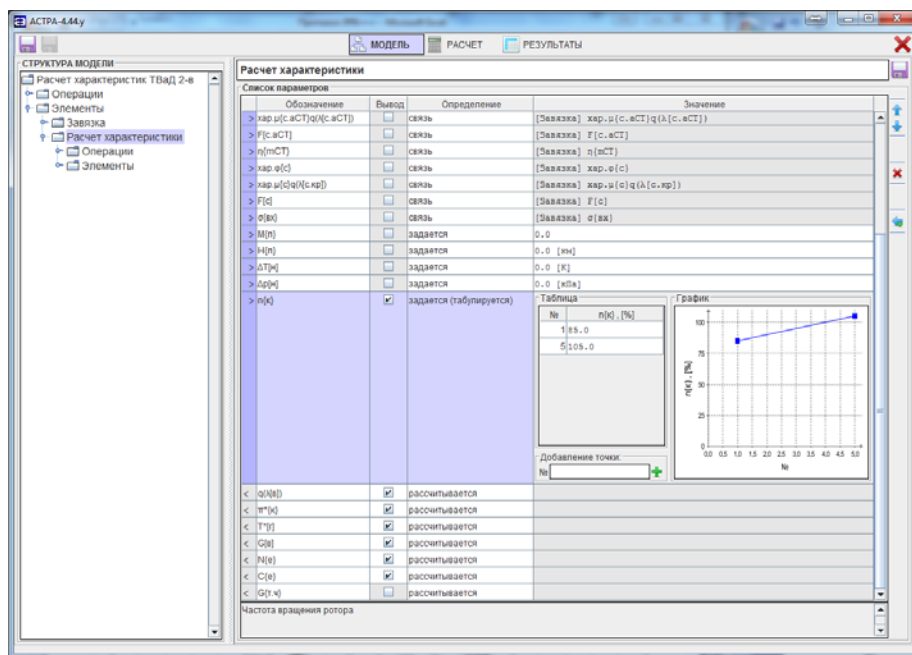


Рис. 7.13. Ввод данных для расчета дроссельной характеристики и линии совместной работы ТВаД со свободной турбиной и одновальным газогенератором

Расчет дроссельной характеристики и линии совместной работы для одновального ТВД при $n = \text{const}$.

После запуска автоматизированной системы АСТРА в главном окне необходимо нажать кнопку «Открыть модель» (см. рис. 7.10).

Далее необходимо выбирать специально созданную для проведения лабораторной работы модель ГТД, которая называется «хар–ТВД–1v.mdl.xml» (рис. 7.14).

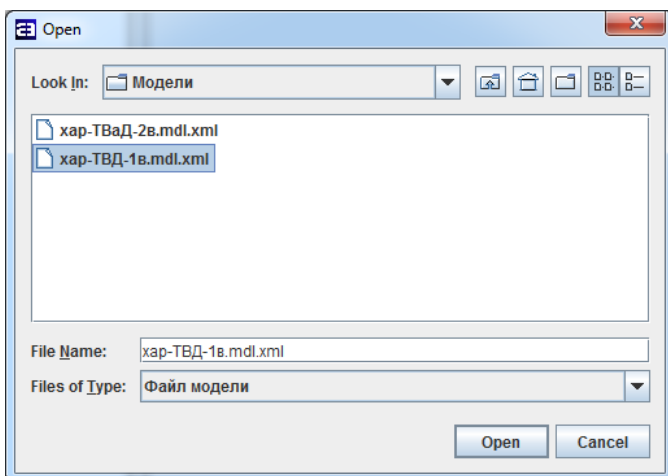


Рис. 7.14. Окно выбора модели для загрузки

После открытия модели ГТД необходимо выделить в дереве структуры модели элемент «Завязка» и в соответствии с заданием внести свои исходные данные для проектного расчета (завязки) (рис. 7.15).

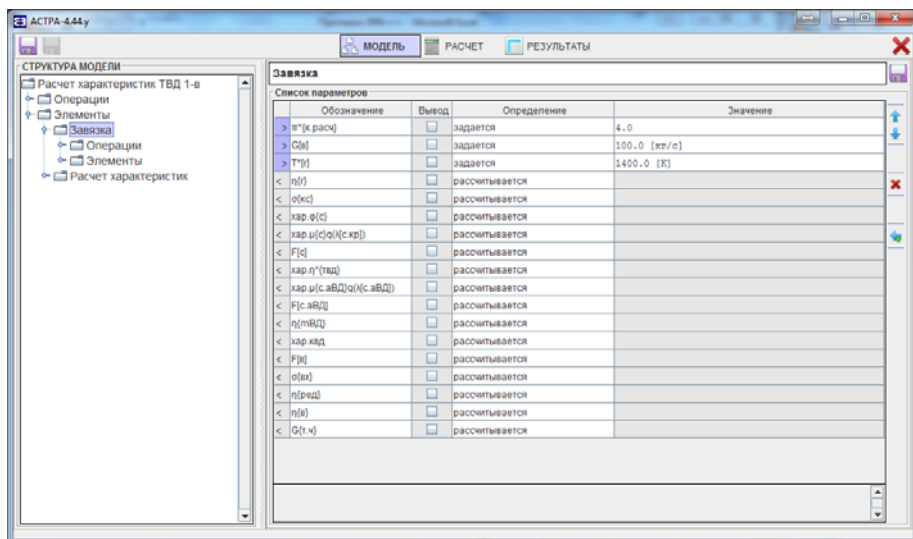


Рис. 7.15. Ввод исходных данных для завязки двигателя

После ввода исходных данных для завязки двигателя необходимо ввести исходные данные для расчета характеристик. Для этого необходимо выбрать в дереве структуры элемент «Расчет характеристики» и внести необходимые для расчета данные.

Для расчета дроссельной характеристики и построения линии совместной работы необходимо задать следующие данные (рис. 7.16):

- скорость полета $M_{п} = 0$;
- высота полета $H_{п}=0$;
- **табулирование** температуры газа перед турбиной $T_{г}^* = 1100...1400$ (5 точек);
- частота вращения ротора $n_{к} = 100\%$;
- коэффициент отбора мощности $\eta_{отб}$ - рассчитывается.

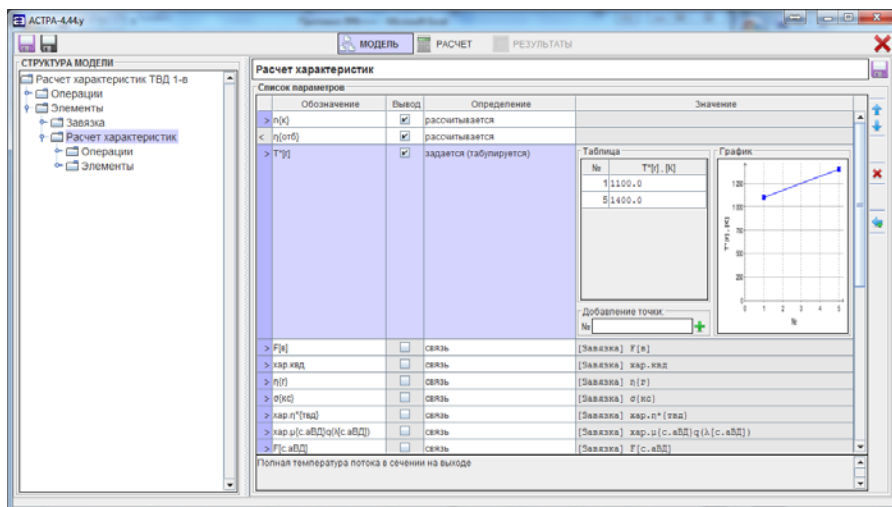


Рис. 7.16. Ввод данных для расчета дроссельной характеристики и линии совместной работы одновального ТВД

Полученные результаты необходимо скопировать в файл отчета в соответствующие таблицы.

Расчет дроссельных характеристик и линий совместной работы для одновального ТВД с $\eta_{отб} = idem$.

Дроссельные характеристики и линии совместной работы рассчитываются для трех значений коэффициента отбора мощности: $\eta_{отб}$ в исходной точке ($n_k = 100\%$, $T_{г}^*$ - заданная) и $\eta_{отб} \pm 10\%$ от значения в исходной точке.

Для расчета дроссельных характеристик и построения линий совместной работы для одновального ТВД с $\eta_{отб} = idem$ необходимо задать следующие данные (рис. 7.17):

- скорость полета $M_{п} = 0$;
- высота полета $H_{п} = 0$;
- температура газа перед турбиной $T_{г}^*$ - рассчитывается;
- **табулирование** частоты вращения ротора $n_k = 85...105\%$ (5 точек);
- коэффициент отбора мощности $\eta_{отб}$ - **задается**.

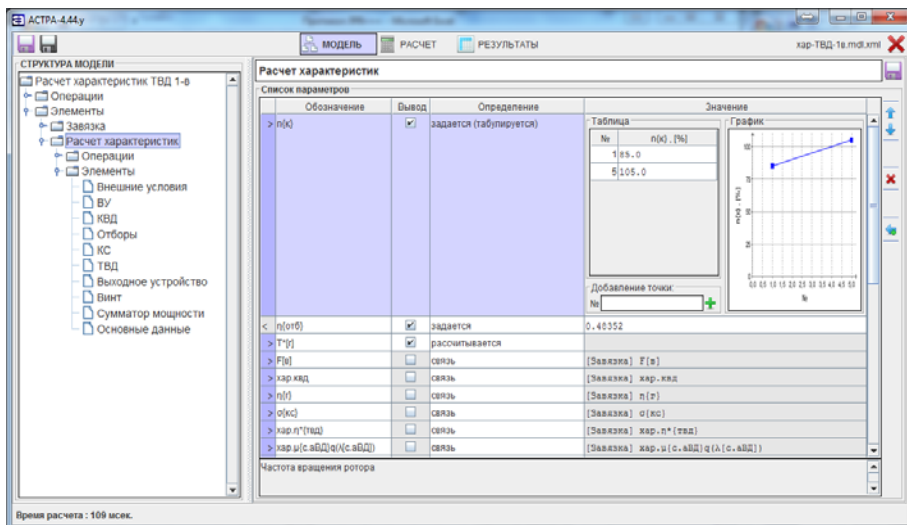


Рис. 7.17. Ввод данных для расчета дроссельной характеристики и линии совместной работы одновального ТВД с $\eta_{отб} = var$

Полученные результаты необходимо скопировать в файл отчета в соответствующие таблицы. Графики на листах отчета будут построены по внесенным данным автоматически. Необходимо проверить их соответствие теоретическим зависимостям, а затем получить разрешение на печать отчета.

После этого необходимо провести письменный анализ и сделать соответствующие выводы по указанным выше задачам:

- анализ дроссельной характеристики и положения линии совместной работы на характеристике компрессора в системе ТВаД со свободной турбиной и одновальным газогенератором;

- анализ дроссельной характеристики и положения линии совместной работы на характеристике компрессора в системе одновального ТВД;
- анализ дроссельных характеристик и линий совместной работы на характеристике одновального ТВД при $\eta_{отб} = idem$ и $n = var$;
- сравнительный анализ дроссельных характеристик и протекания линий совместной работы на характеристиках компрессоров одновального ТВД (при $n = const$) и ТВаД с одновальным газогенератором и свободной турбиной;
- сравнительный анализ дроссельных характеристик и протекания линий совместной работы на характеристиках компрессоров одновального ТВД с $\eta_{отб} = idem$ и одновального ТРД с $F_c = idem$ (по результатам лабораторной работы 6).

Распечатанные листы отчета сшиваются с бланком задания, который помещается в качестве первой страницы.

В заключение необходимо подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

7.4 СДАЧА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

В процессе сдачи лабораторной работы необходимо обосновать сделанные выводы, ответить на заданные преподавателем 2-3 вопроса из указанного списка. Эти ответы нужно будет приложить в конце отчета по лабораторной работе.

Лабораторная работа сдается преподавателю в распечатанном виде, электронная версия формируется студентом по образцу.

7.4.1 Контрольные вопросы

1. Особенности совместной работы узлов одновального ТВД с винтом изменяемого шага и ТВаД со свободной турбиной.

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 $\varphi_v = var$ с одновальным ТРД при $F_{с.кр} = var$.

4. Сравните дроссельные характеристики одновального ТВД и ТВаД со свободной турбиной.

5. Расскажите об особенностях управления одновального ТВД.

6. Преимущества и недостатки одновального ТВД и ТВаД со свободной турбиной как силовых установок вертолета.

7. Особенности дроссельных характеристик одновального ТВД и ТВаД со свободной турбиной.

8. Сравнительный анализ влияния площади сопла в системе одновального ТРД (см. лабораторную работу 6) и угла установки винта (коэффициента отбора мощности $\eta_{отб}$) в системе одновального ТВД на положение линий совместной работы и дроссельные (обобщенные) характеристики этих двигателей $T_{гпр}^*$, π_k^* , $P_{пр}(N_{э.пр})$, $C_{уд пр}(C_{э пр}) = f(n_{пр})$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кулагин В.В., Кузьмичев В.С. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ [Текст]: учебник. В 2 кн. Кн. 1. / 3-е изд. – М.: Машиностроение, 2013. – 336 с.
2. Кулагин В.В., Кузьмичев В.С. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики [Текст]: учебник. В 2 кн. Кн. 2. / 3-е изд. – М.: Машиностроение, 2013. – 280 с.
3. Формирование виртуальных моделей рабочего процесса ГТД различных типов и схем в САЕ-системе АСТРА [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. В.С. Кузьмичев, В.В. Кулагин, А.Ю. Ткаченко, В.Н. Рыбаков, И.Н. Крупенич. Электрон. текстовые и граф. дан. (987 Кбайт). - Самара, 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Учебное издание

*Кузьмичев Венедикт Степанович
Кулагин Виктор Владимирович
Ткаченко Андрей Юрьевич
Рыбаков Виктор Николаевич
Крупенич Илья Николаевич*

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЗЛОВ ВЫПОЛНЕННОГО ГТД И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Лабораторный практикум

Редактор Н.С. Купринова
Доверстка Л.Р. Дмитриенко

Подписано в печать 2.09.2016. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 4,0.

Тираж 300 экз. Заказ . Арт. 17/2016.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского университета. 443086 Самара, Московское шоссе, 34.