

Министерство высшего и среднего специального
образования РСФСР

Куломшевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева

ВЫБОР ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ,
АНАЛИЗ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ УЗЛОВ
И РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ГТД.

Методические указания
к курсовой работе по теории ВРД

Куломшев 1981

Авторы – составители: С.К.Бочкарев, В.В.Кулагин,
В.С.Кузьмичев, В.Б.Домакин

УДК 629.7.036

Выбор закона регулирования, анализ совместной работы узлов и расчет характеристик ГТД: Метод.указания / Кузбывшев, авиац.ин-т; Сост. С.К.Бочкарев, В.В.Кулагин, В.С.Кузьмичев, В.Б.Домакин. Кузбывшев. 1990. 40 с.

Изложено содержание курсовой работы по теории ВРД. Даны указания к выполнению каждого раздела и оформлению расчетно-пояснительной записки. Приведены необходимые вспомогательные материалы.

Методические указания предназначены для студентов специальности 13.02 (МТК), а также могут быть использованы студентами специальности 13.02 ЦИПС.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Кузбывшевского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С.П.Королева

Рецензенты: С.И.В е с е л о в, Ю.Л.К о в ы л о в

Курсовая работа "СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЗЛОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ГТД" посвящена практическому изучению очередного этапа проектирования авиационного двигателя, начатого в курсовой работе "Основные закономерности рабочего процесса и проектный термодинамический расчет авиационных газотурбинных двигателей".

При выполнении курсовой работы студент изучает совместную работу узлов, выбирает закон регулирования, рассчитывает и исследует характеристики заданного двигателя. За исходную расчетную точку принимаются результаты проектного термодинамического расчета ГТД, полученные при выполнении предыдущей курсовой работы по теории ВРД. Параметры, характеризующие геометрические размеры двигателя, определенные при проведении проектного термодинамического расчета, являются заданными для данной курсовой работы.

Расчеты характеристик ГТД при выполнении курсовой работы производятся на ЭВМ.

Ориентировочный объем работы 10-15 с.

Основные требования к оформлению курсовой работы приведены в прил. I и в /6/.

Для успешной защиты курсовой работы студент должен усвоить материал гл. 11, 12 и 13 курса лекций по теории ВРД (или / 4 /), а также разделы, касающиеся особенностей двигателей с несколькими регулирующими факторами, в гл. 14 и 15.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ВВЕДЕНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

Во введении рекомендуется очень кратко охарактеризовать данный двигатель (напомнить его тип, схему, основные данные, термодинамические параметры, написать, чем отличается он от простотипа), а также привести параметры и геометрические характеристики, которые являются исходными для выполнения последующих расчетов. Далее следует перечислить, что Вами проделано в этой работе, какие характеристики рассчитаны, с какими трудностями Вы столкнулись.

Объем введения не должен превышать одной страницы.

1. ВЫБОР ЗАКОНА И ПРОГРАММЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Сделайте предварительный элементарный выбор закона регулирования. Опишите, как (из каких условий) выводится закон регулирования. Какие законы регулирования двигателей заданного типа Вы знаете?

Для однозвального ТРД можно рекомендовать (для простоты) закон регулирования $n = const$ с ограничениями на взлетном режиме (см. подраздел 13.1 / 4 /).

Для ТВД и турбовальных двигателей необходимо задавать два параметра, характеризующих режим (см. подраздел 13.2 / 4 /).

Два параметра, характеризующие режим, задаются также для ТРД с регулируемым соплом (см. подраздел 14.2 / 4 /). А на ТРД и ТРДД с регулируемым соплом режим определяется тремя параметрами (см. подраздел 15.4 / 4 /). Необходимо внимательно подходить к выбору параметров, определяющих режим двухвальных и трехвальных двигателей с несколькими регулирующими факторами, так как турбокомпрессоры высокого давления этих двигателей ведут себя как двигатели с неизменяемыми характерными сечениями. Вам нужно принять решение: сколько регулирующих факторов будет у пресектируемого Вами двигателя, какие параметры Вы принимаете в качестве параметров регулирования (режима)? Принятые решения нужно обосновать особенностями совместной работы узлов и регулирования двигателей рассматриваемых схем, которые излагаются в учебном пособии / 4 / и на лекциях по теории ВРД, а также результатами расчетов (раздел 3) характеристик двигателя, проведенных при различных возможных вариантах закона регулирования.

Если рассчитывается дроссельная характеристика, то соответственно выбирается программа регулирования двигателя.

Выборный закон (или программа) регулирования конкретно для заданного двигателя (в цифрах) изображается в виде графика, численные значения которого в общем случае получаются по результатам расчета (раздел 3) характеристик двигателя. Целесообразно также привести структурную схему регулирования двигателя.

2. ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ УЗЛОВ ГТД ЗАДАННОГО ТИПА И СХЕМЫ

На основе гл. II /4/ делается краткий общий анализ совместной работы узлов рассчитываемого двигателя. Описываются особенности совместной работы узлов рассчитываемого двигателя. При этом используются следующие разделы /4/ : I2.1 - многовальный газогенератор, I2.5 - ТРД со смещением потоков, I4.1I - газогенератор при изменении пропускной способности за турбиной, I4.2 - газогенератор с регулируемой турбиной, соплом и компрессором, I4.3 - многовальный газогенератор с регулируемым сечением, I5.1 - ТВД и турбовальный двигатель, I5.3 - ТРДФ и ТРДФс.

2.1. Уравнение линии совместной работы, его анализ

Объяснить, из каких условий выводится уравнение совместной работы и проанализировать его. Следует помнить, что для двигателей с несколькими регулирующими факторами положение линии совместной работы зависит в общем случае от закона регулирования. Чтобы не сделать ошибку, рекомендуется до расчета линии совместной работы изучить соответствующие разделы курса.

Для одновальных двигателей с двумя или тремя регулирующими факторами целесообразно на характеристику компрессора нанести сетку линий $T_{COP}^* = const$. Для одновального ТВД на характеристику компрессора наносятся линии совместной работы или точки совместной работы, соответствующие различным полетным и полетным условиям (различная T_c^*). принятому закону регулирования температуры газа перед турбиной T_c^* и частоты вращения ротора.

2.2. Расчет линии совместной работы

В зависимости от типа двигателя и степени повышения давления в исходной расчетной точке на взлетном режиме выбрать типовую характеристику компрессора (см. прил. 2). На рис. П2.1 - П2.6 приведены типовые характеристики осевых компрессоров, представленных в относительном виде. Положение исходной расчетной точки на этих характеристиках задается величинами $\bar{\pi}_k^* = 1$, $\bar{q}(\lambda_{sk}) = 1$. Выбранная характеристика перестраивается на миллиметровую бумагу.

Расчитать линию совместной работы. При выполнении расчетов целесообразно задаться величинами $q(\lambda_{sk})$, по уравнению (II.7,а) / 4 / вычислить соответствующее значение $\bar{\pi}_k^* / \sqrt{\beta_k}$, по которому с помощью номограммы (см. прил. 3) подобрать величины $\bar{\pi}_k^*$ и \bar{z}_k на характеристике компрессора. Перед нанесением рабочей точки на характеристику компрессора ее координаты приводятся к относительному виду (т.е. $\bar{\pi}_k^* = \bar{\pi}_k^* / \bar{\pi}_{k0}^*$; $\bar{q}(\lambda_{sk}) = q(\lambda_{sk}) / q(\lambda_{sk})_0$; $\bar{z}_k = z_k / z_{k0}$, где $\bar{\pi}_{k0}^*$, $q(\lambda_{sk})_0$, z_{k0} - значения параметров компрессора в расчетной точке, полученные в предыдущей курсовой работе при выполнении проектного расчета).

Для двухвальных ТРД и ТРДД линия совместной работы рассчитывается и наносится на характеристику компрессора высокого давления, на характеристику компрессора низкого давления линия совместной работы наносится по результатам расчетов характеристик двигателя на ЗЕМ.

Определить запасы устойчивой работы компрессора и построить их, например, в зависимости от приведенной частоты. Дать предложения по увеличению запасов устойчивости, если это необходимо.

Результаты расчета линий совместной работы и запасов устойчивой работы компрессора необходимо свести в таблицы.

Проведенный анализ совместной работы позволяет обосновать выбор параметров регулирования двухвальных или трехвальных двигателей с несколькими регулируемыми факторами. Поэтому выводы раздела I, касающиеся выбора параметров регулирования, должны быть согласованы с результатом проведенного в разделе 2 анализа. Объем раздела 2 - 3...4 с.

3. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ

В данном разделе производится расчет заданной характеристики двигателя.

3.1. Методика расчета

На основе материала лекций и подразделов 13.2, 14.4, 15.5/4/ составить методику расчета высотно-скоростных характеристик, описать принципы составления, особенности, основные уравнения и ее отличия от методики проектного термодинамического расчета, отметить, что является заданным для расчета. При составлении методики следует иметь в виду, что к.п.д. компрессоров являются переменными величинами, для определения которых необходимы характеристики компрессоров. Остальные к.п.д. и коэффициенты потерь принимаются постоянными, равными их значениям в исходной расчетной точке (на взлетном режиме). Составленную методику целесообразно показать консультанту.

3.2. Результаты расчета, их анализ

Расчеты характеристик двигателя проводятся на ЭВМ ЕС-1055 (5-й корпус института, дисплейный класс ЕС-1055) по готовой программе. Порядок работы с программой "VSDX" расчета характеристик ГТД на ЭВМ приведен в приложении 4. На характеристике рассчитывается 4...5 точек. Расчет характеристик производится при предварительном выборе в разделе I закона регулирования, а также при одном-двух других возможных законах регулирования. По полученным результатам окончательно выбирается закон регулирования двигателя.

В общем случае закон регулирования, как известно (раздел 14.1.2 /4/), выбирается по условиям обеспечения заданных технических требований, предъявленных к летательному аппарату. В данном случае он выбирается из условия обеспечения заданной тяги. Программа регулирования двигателя с несколькими регулирующими факторами выбирается из условия обеспечения минимального расхода топлива.

После окончательного выбора закона (программы) расчета, далее следует вернуться к разделу I и уточнить его.

Диапазон изменения внешних условий при расчете характеристик нужно выбирать в соответствии с тактико-техническими данными летательного аппарата, на котором установлен двигатель, и согласовать с консультантом. Рассчитанные характеристики необходимо представить в графическом виде. На графике должны быть представлены основные данные (P , G_T , G_{3T}), термодинамические параметры (T_r^* , $T_{cнд}$, $T_{cвд}$, m^* , $T_{cнд}$, $T_{cвд}$), удельные параметры ($P_{уд}$, $C_{уд}$), параметры в характерных сечениях проточной части (T_c^* , T_T^* и др.), частоты вращения $n_{нд}$, $n_{вд}$, $n_{нд пр}$, $n_{вд пр}$. На характеристики компрессора наносятся линии совместной работы, вычисляются запасы устойчивой работы компрессоров. Полученные значения $\Delta K_{унд}$ и $\Delta K_{увд}$ наносятся на график.

Значения одноименных параметров, рассчитанные при различных законах регулирования, наносятся на один график.

Полученные результаты анализируются в письменном виде. При этом объясняются характер изменения рассчитанных параметров, например, в зависимости от высоты, скорости полета или температуры наружного воздуха, а также влияние закона регулирования на закономерности изменения параметров двигателя.

Подчеркнем, что обоснование принятого закона (программы) регулирования, анализ совместной работы узлов и полученных результатов расчета характеристик, а также составление методики расчета характеристик двигателя является главным содержанием курсовой работы и должны быть изложены подробно.

Библиографический список

1. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей / Под ред. С.М.Шлихтенко. М.: Машиностроение, 1987. 568 с.
2. Теория двухконтурных турбореактивных двигателей / Под ред. С.М.Шлихтенко, В.А.Сосунова. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
3. ИУЧАЕВ Ю.Н., ФЕДОРОВ Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1978. 336 с.
4. КУЛАГИН В.В. Теория ВРД. Совместная работа узлов и характеристики газотурбинных двигателей. Куйбышев: КуйДИ, 1968. 240 с.
5. МАСЛЕННИКОВ М.М., БЕЖЛИ Ю.Г. и др. Газотурбинные двигатели для вертолетов. М.: Машиностроение, 1969. 380 с.
6. ЗАВРИНОВ В.Н. и др. Требования к оформлению учебных текстовых документов: Метод. указания / Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. 30 с.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

1. Расчетно-пояснительная записка оформляется в стандартной для данной курсовой работы обложке (она выдается на кафедре). На титульном листе обложки необходимо дать название курсовой работы, в котором отразить тип проектируемого ГТД, срок выполнения данной курсовой работы согласно учебному плану.

2. Первый лист расчетно-пояснительной записки - заполненный бланк задания, второй - реферат, третий - содержание. Далее идет введение и содержание трех основных разделов курсовой работы. В конце пояснительной записки приводится список использованных источников. В приложении помещаются листинги с результатами расчетов на ЭВМ. Все листы расчетно-пояснительной записки должны быть пронумерованы. Номер листа указывается в его правом верхнем углу.

3. При оформлении расчетно-пояснительной записки необходимо использовать условные обозначения по ГОСТ 23851-79, которые приняты также в /4/ и лекциях по курсу "Теория ВРД".

В листингах с результатами расчетов характеристик ГТД на ЭВМ значения параметров двигателей приводятся в следующих единицах измерения:

$$\text{давление} - p \text{ [кПа]} = p \text{ [Па]} \cdot 10^{-3};$$

$$\text{удельная работа} - L \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right] = L \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right] \cdot 10^{-3};$$

$$\text{удельная тяга} - P_{40} \left[\frac{\text{кН} \cdot \text{с}}{\text{кг}} \right] = P_{40} \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{кг}} \right] \cdot 10^{-3};$$

$$\text{тяга} - P \text{ [кН]} = P \text{ [Н]} \cdot 10^{-3};$$

$$\text{мощность} - N \text{ [кВт]} = N \text{ [Вт]} \cdot 10^{-3};$$

$$\text{удельный расход топлива для ТВД и ТВД} - C_{40} \left[\frac{\text{кг}}{\text{кН} \cdot \text{ч}} \right] = C_{40} \left[\frac{\text{кг}}{\text{Н} \cdot \text{ч}} \right] \cdot 3,6 \cdot 10^{-3};$$

$$\text{удельный расход топлива для ТВД и ТВД} - C_e \left[\frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} \right] = C_e \left[\frac{\text{кг}}{\text{Вт} \cdot \text{ч}} \right] \cdot 3,6 \cdot 10^{-3};$$

4. Результаты расчетов характеристик на ЭВМ должны быть представлены в графическом виде.

5. Графики необходимо строить на миллиметровой бумаге стандартного формата в удобочитаемых масштабах с указанием единиц измерения приведенных на них параметров. Все рисунки должны быть пронумерованы и иметь названия.

6. В тексте расчетно-пояснительной записки необходимо делать ссылки на используемую литературу. Для этого в нужном месте в квадратных скобках указывают номер источника в списке используемой литературы.

7. В реферате приводятся сведения об объеме пояснительной записки, перечень ключевых слов, отражающих суть выполненной работы.

8. Оформленная расчетно-пояснительная записка в шитом виде предъявляется консультанту для проверки. При последующих доработках листы в записке не замешаются, а дополнительные записи и пояснения производятся на обороте листа.

9. Курсовая работа выполняется согласно следующему графику

Учебная неделя	Содержание работы
8	подготовка разделов I, 2
9	подготовка подраздела 3.1
10	подготовка подраздела 3.2 (100%)
11	представление курсовой работы на проверку
12	защита курсовой работы

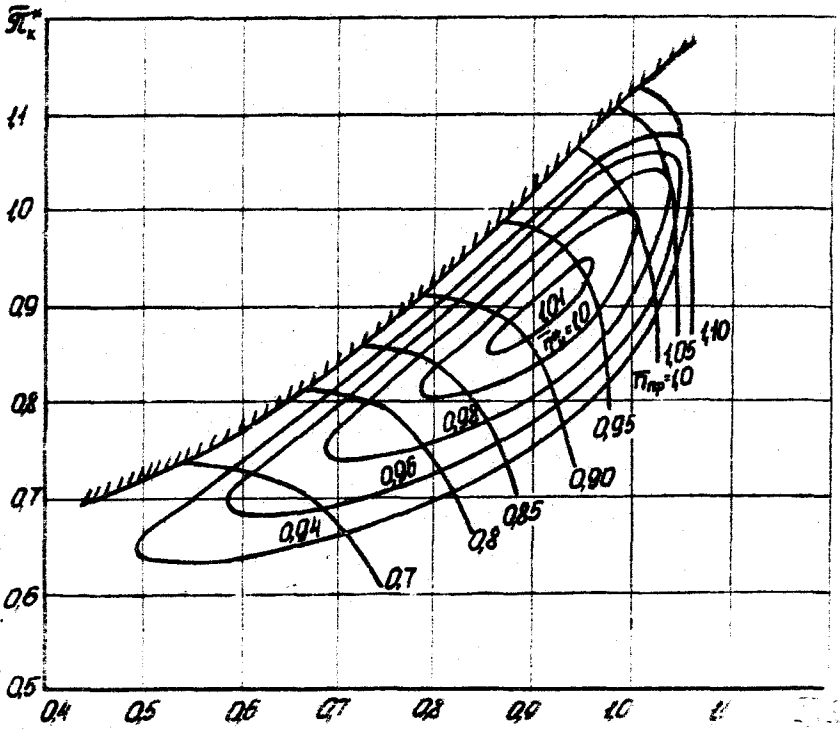
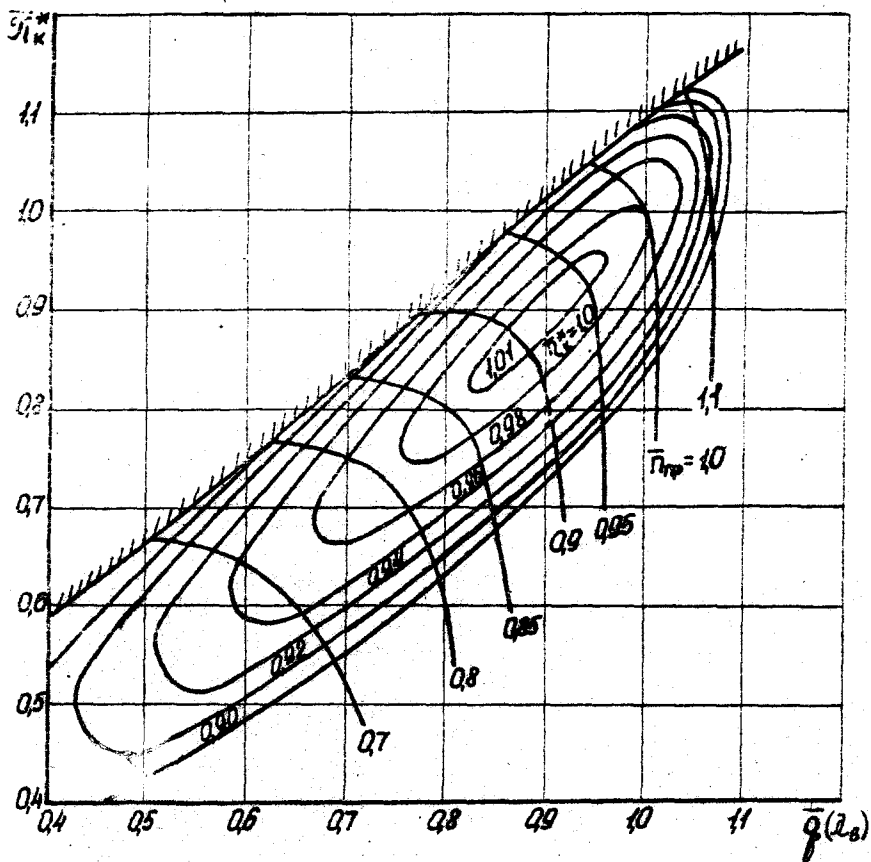
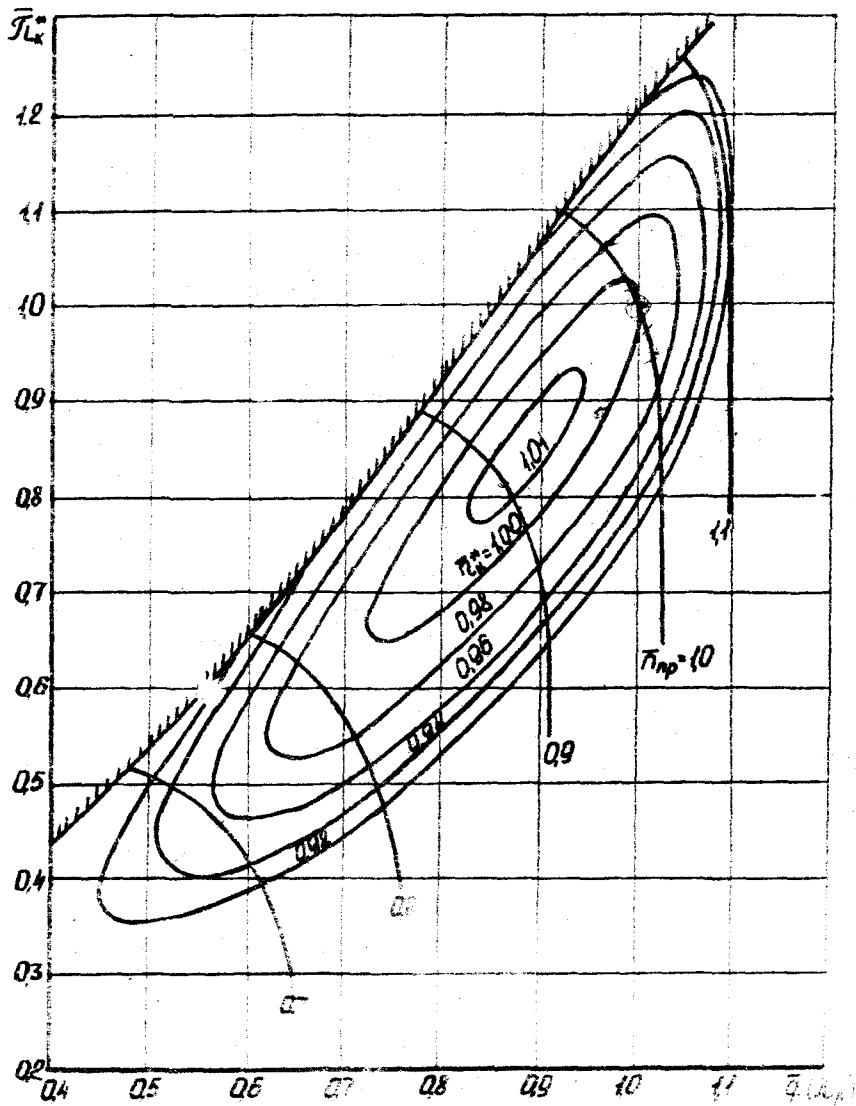


Рис. 1. Кривые уровня функции потерь \bar{y}_k для различных значений π_{mp} .

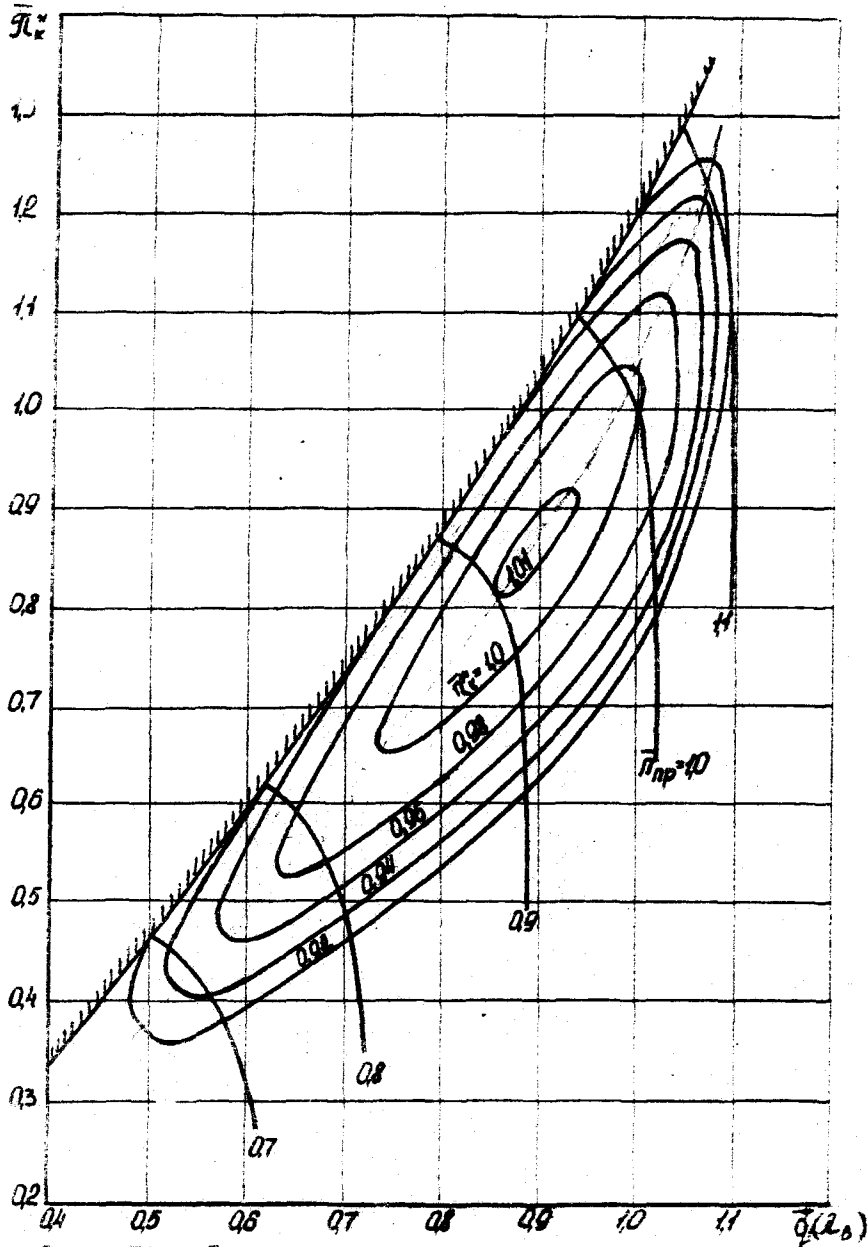


Р и с. П2.2. Типовая характеристика осевого компрессора
на $\bar{\pi}_{к0}^* = 2,2 \dots 3,0$



Р и с. ИЭ.3. Изопная характеристика осевого компрессора
 на $\bar{\pi}_{L_2} = 5,0 \dots 6,0$

2005.10.15



Р и с. П2.4. Типовая характеристика осевого компрессора.
на $\pi_{k0}^* = 0.0 \dots 3.0$

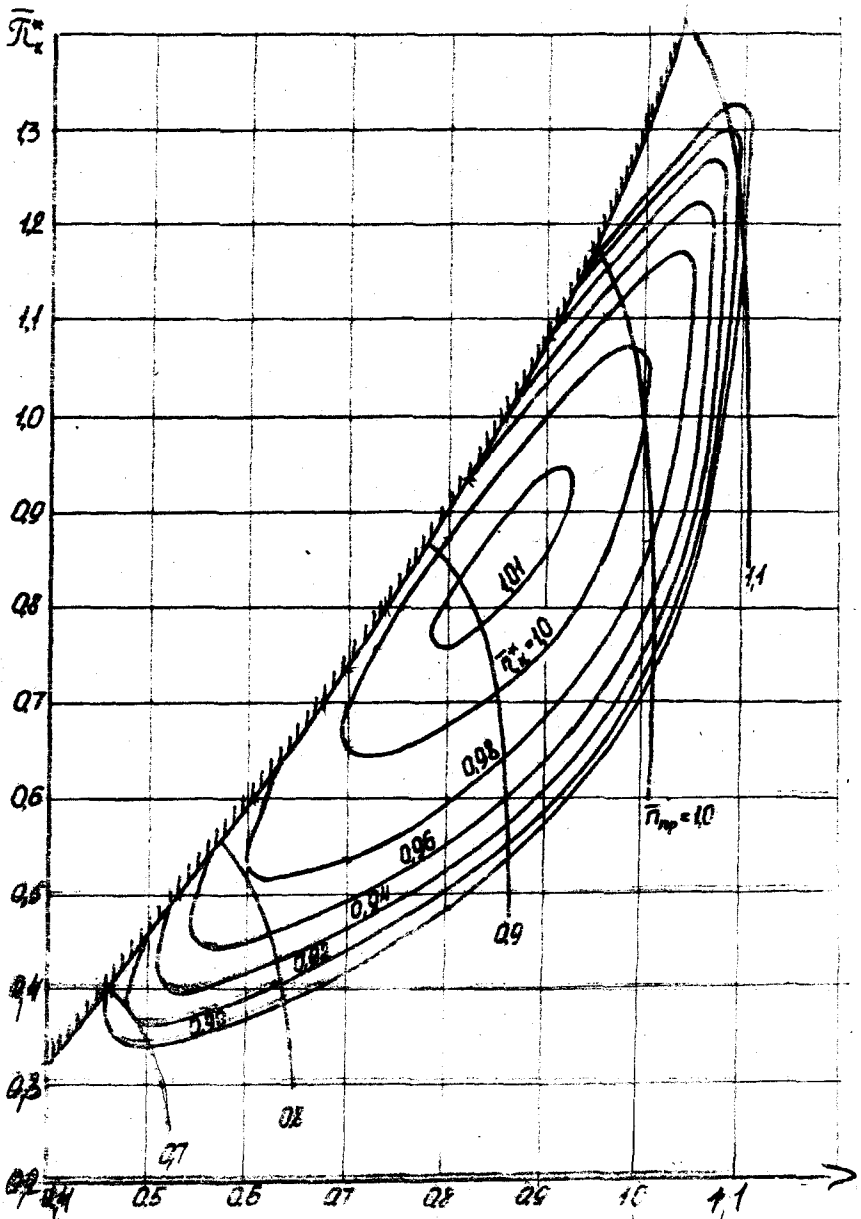


Рис. 5. Типовая характеристика

с $\bar{r}_{z0} = 8 \dots 16$

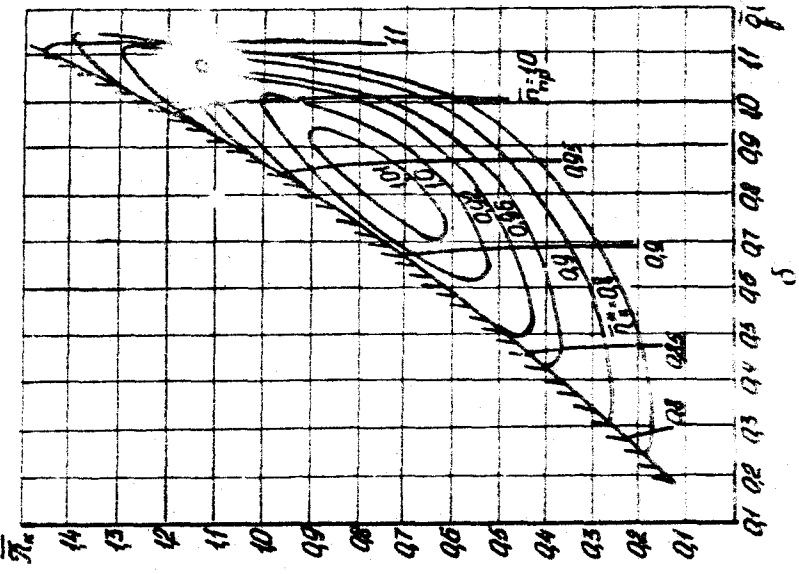
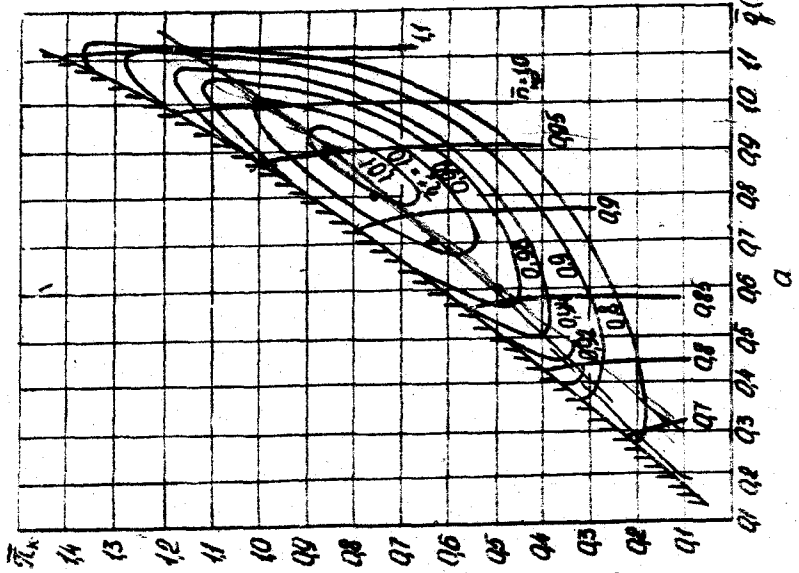


Рис. 112.6. Численные кривые для функции $\bar{\pi}_n$ и $\bar{q}(n)$ соответственно:
 $\beta = 0.1, \alpha_0 = 16 \dots 18, \bar{\pi}_n = 10, 100, \bar{q}(n_0) = 0.18, \bar{q}(n_1) = 0.23$

$$\frac{\eta_{cr}}{\sqrt{\frac{\eta_{cr}}{\eta_{cr} - 1}}} \cdot 2x$$

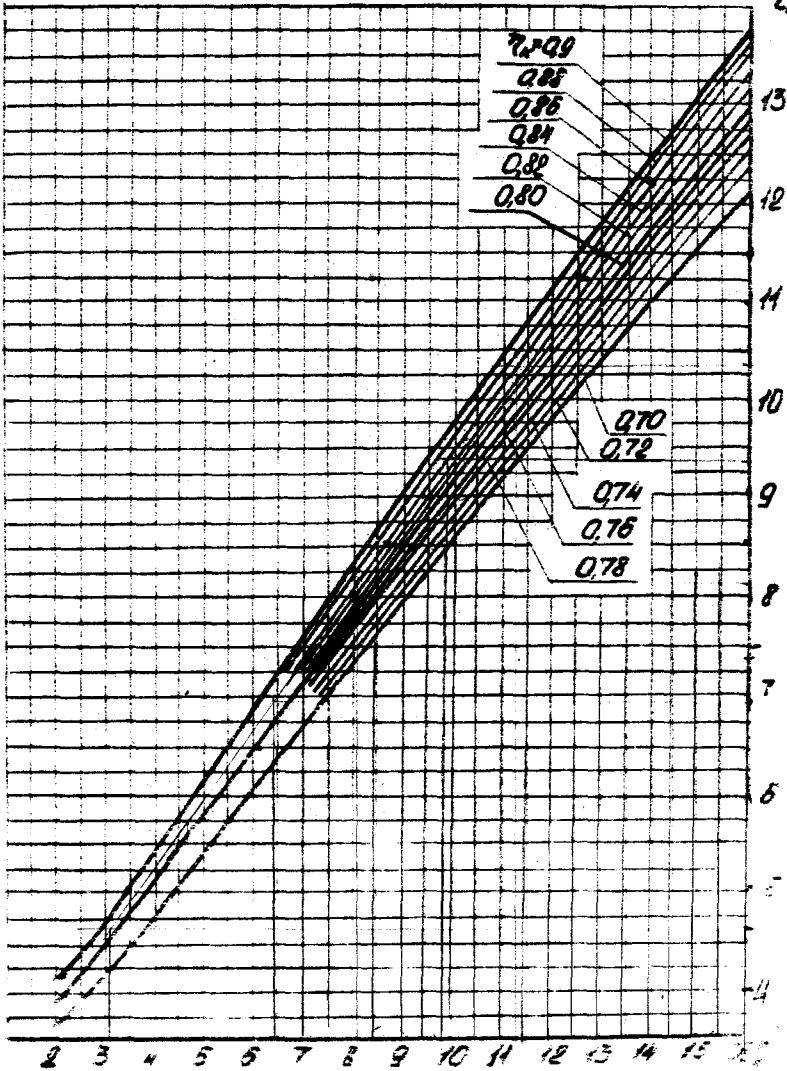


Рис. 1. Зависимость коэффициента сопротивления от скорости течения для различных значений параметра η_{cr} .

где η_{cr} — критический коэффициент сопротивления; η — коэффициент сопротивления; x — относительная толщина слоя.

ПОРЯДОК РАБОТЫ С ПРОГРАММОЙ " VSDX "
 РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ТТД НА ЭВМ

Расчет может производиться одновременно на пяти терминалах, с каждого из них запускается окна из виртуальных машин с именами:

TDLA1, . . . , TDLA5.

Для начала работы на конкретной виртуальной машине следует выполнить следующие действия:

- нажать клавишу "ВВОД";
- ввести команду: $\angle \angle$ < имя виртуальной машины > ; *
- ввести пароль (паролем служит имя виртуальной машины, пароль на экран дисплея не выводится).

После выдачи на экран специфических сообщений ЭВМ необходимо запустить программу расчета характеристик, для чего

- ввести команду " VSDX " .

В дальнейшем работа ведется в соответствии со сценарием диалога, реализованного в программе " VSDX " .

Подготовка исходных данных и выполнение расчетов

Выполнение расчета характеристик с помощью программы " VSDX " требует подготовки строго определенной совокупности исходных данных. Результатом работы программного комплекса является выходной документ (распечатка), в котором распечатываются подготовленные исходные данные и результаты расчета. Так как в кодировке информации на ЭВМ отсутствуют греческий алфавит и подстрочная и надстрочная индексация, широко применяемая в общепринятых условных обозначениях, то при подготовке исходных данных и в выходном документе используют специальные условные обозначения - идентификаторы. Их расшифровке, порядок подготовки исходных данных и выполнения расчета приводятся ниже.

* Для ввода этой и всех последующих команд необходимо нажать клавишу "ВВОД"

Выполнение расчетов ведется в системе единиц СИ. Размерность параметров, задаваемых в исходных данных и получаемых в результате расчета, приведена в табл. П.4.9.

При подготовке исходных данных (заполнении таблицы) необходимо пользоваться функциональными клавишами:

ПФ1 - обратное листание текста таблицы на экране ;

ПФ2 - прямое листание текста таблицы на экране ;

ПФ3 - запись таблицы с подготовленными данными на диск.

При просмотре результатов расчетов необходимо пользоваться следующими функциональными клавишами:

ПФ1 - обратное листание текста распечатки результатов ;

ПФ2 - прямое листание текста распечатки результатов ;

ПФ12 - выход из режима просмотра.

Если при просмотре результатов или при подготовке исходных данных после нажатия функциональных клавиш ПФ1 или ПФ2 возникает звуковой сигнал и картинка на экране дисплея не меняется, то значит Вы перепутали их назначение. Продолжить работу можно после нажатия клавиши "СБРОС".

Структура исходных данных

Структура исходных данных для расчета характеристик имеет табличную форму. В качестве примера в табл.П.4.1 приведены исходные данные для расчета двухвального ТРДом. Подготовка исходных данных заключается в записи необходимого числового значения непосредственно после знака равенства в отведенном поле. Дробную часть числа от целого отделяет точкой.

В первой строке таблицы записывается информация о студенте Ф.И.О., номер группы и номер задания.

Во второй строке таблицы задается тип и схема двигателя (с помощью условных чисел), номер расчетного числа точек характеристики и специальный код, полученный у преподавателя и разрешающий выполнить расчет с помощью данной программы. Условные номера соответствующие различным типам и схемам двигателей приведены в табл. П.4.2. Необходимое для расчета число точек характеристики задается в третьей строке, не должно превышать 100.

Пример таблицы исходных данных

СТУДЕНТ	ГРУППА	ЗАДАНИЕ	КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ТИП И СХЕМА ДВИГАТЕЛЯ	ЧИСЛО ТОЧЕК ХАРАКТЕРИСТИКИ	КОД	
ВЫСОТА H_H	МАКС M_H	DELTA P_H	DELTA T_H
ПИ ВЕНТ Σ_{π} ПИ КВА Σ_{κ}	ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ КОД	КОЭФФИЦИЕНТ	КОЭФФИЦИЕНТ
ПИ КВА Σ_{κ} ТРА T_{π}	ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ КОД	ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ КОД	ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ КОД
АВУХКОНТ = П	МАКС M_H	DELTA P_H	DELTA T_H
ТОЧКА	ВЫСОТА	МАКС	DELTA P_H
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			

ОХЛ. МАСС. $G_{\text{ОХЛ}}$ | ТРА. АВ. $P_{\text{ТРА}}$
 ОХЛ. МАСС. $G_{\text{ОХЛ}}$ | СИГМА $\sigma_{\text{ОХЛ}}$
 СИГМА $\sigma_{\text{ОХЛ}}$ | СИГМА $\sigma_{\text{СИГ}}$
 СИГМА $\sigma_{\text{СИГ}}$ | СИГМА $\sigma_{\text{СИГ}}$
 СИГМА $\sigma_{\text{СИГ}}$ | СИГМА $\sigma_{\text{СИГ}}$

ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ КОД

ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ КОД

Таблица П.4.2

Условное число	Тип и схема двига- теля	Условное число	Тип и схема двигателя
1	Одновалный ТРД	II	ТВД с одновальным турбокомпрессором и свободной турбиной
2	Двухвалный ТРД		
3	Одновалный ТРДФ		
4	Двухвалный ТРДФ	I2	ТВД с двухвальным турбокомпрессором и свободной турбиной
5	ТВаД с одновальным турбокомпрессором и свободной турбиной	9	
		10	Двухвалный ТРДД
6	ТВаД с двухвальным турбокомпрессором и свободной турбиной	I3	Трехвалный ТРДД
		I4	Двухвалный ТРДДсм
		I5	Трехвалный ТРДДсм
7	Одновалный ТВД	I6	Двухвалный ТРДДфсм
8	Двухвалный ТВД		Трехвалный ТРДДфсм

В третьей строке таблицы П.4.1 записываются внешние условия и тяга двигателя, при которых проводился проектный термодинамический расчет в прошлом семестре.

В средней части таблицы П.4.1 задаются параметры рабочего процесса и КПД узлов из проектного термодинамического расчета (при необходимости расшифровке применяемых идентификаторов рекомендуется обратиться к таблице П.4.9).

В нижней части таблицы П.4.1 задаются исходные данные отдельно для каждой точки рассчитываемой характеристики. Для расчета каждой точки задается высота полета (в метрах), число Маха полета (МАХ), отклонение от САУ по давлению (ΔP_{PH}) и температуре (ΔT_{PH}) наружного воздуха, условное число, которым задаются параметры режима (закон рег.). Это число находится из таблиц П.4.3...П.4.8 в зависимости от параметров режима, численными значениями которых задается закон регулирования, выбранный в разделе I. В трех последних столбцах нижней части таблицы П.4.1 записываются численные значения выбранных параметров режима. Для двигателей с одним, двумя и тремя регулирующими факторами заполняются соответственно один (параметр I), два (параметр I

и параметр 2) или три (параметр 1, параметр 2 и параметр 3) столбца.

В качестве параметра, характеризующего режим, во многих случаях рекомендуется в таблицах П.4.3...П.4.8 задавать частоту вращения ротора. Поскольку лопаточные машины еще не спроектированы, то и действительные значения частот вращения неизвестны. Поэтому они задаются условными числами. Для оценки этих чисел следует иметь в виду, что приведенные частоты вращения ротора компрессора любого каскада в исходной расчетной точке проектного термодинамического расчета приняты равными единице:

$$\bar{n}_{на пр} = 1; \quad \bar{n}_{са пр. вх са} = 1; \quad \bar{n}_{ва пр. вх ва} = 1.$$

Соответствующие значения физических частот определяются по формулам

$$\bar{n}_{на} = \bar{n}_{на пр} \sqrt{\frac{T_H^*}{288}}; \quad \bar{n}_{са} = \bar{n}_{са пр. вх са} \sqrt{\frac{T_{вх са}^*}{288}};$$

$$\bar{n}_{ва} = \bar{n}_{ва пр. вх ва} \sqrt{\frac{T_{вх ва}^*}{288}}$$

Величины условных частот вращения на пониженных режимах следует задавать, используя сведения о дроссельных характеристиках двигателей различных типов и схем, изложенные в /4/. Ориентировочно можно считать, что при снижении $n_{ва}$ ТРД на 10% двигатель переходит с взлетного режима на крейсерский режим (0,7 номинального).

Для одновальных двигателей при выборе условного числа для закона регулирования необходимо учесть, что $\bar{n} = \bar{n}_{на}$.

Таблица П.4.3

Условные числа для ТРД и ТРДД с одним регулирующим фактором (G_T)

Условное число	Параметр режима
	Параметр 1
1.4	T_H^*
2.4	$\bar{n}_{на}$
3.4	$\bar{n}_{ва}$
4.4	G_T
5.4	P

Таблица П.4.4

Условные числа для ТРД и ТРДД
с двумя регулируемыми факторами (G_T и $F_{с.кр}$)

Условное число	Параметры режима	
	Параметр I	Параметр 2
6.Ф	T_r^*	$\bar{p}_{на}$ ✓
7.Ф	T_r^*	$\bar{p}_{на пр}$
8.Ф (ТОЛЬКО для одно- вальных ТРД)	T_r^*	$\bar{p}_{ва}$
9.Ф	$\bar{p}_{на}$	$\bar{p}_{ва}$ ✓

Таблица П.4.5

Условные числа для ТВД
с двумя регулируемыми факторами (G_T и φ_B)

Условное число	Параметры режима	
	Параметр I	Параметр 2
IФ.Ф	N_3	$\bar{p}_{на}$
II.Ф	G_T	$\bar{p}_{на}$
II.Ф	T_r^*	$\bar{p}_{на}$

Таблица П.4.6

Условные числа для ТВад
с двумя регулируемыми факторами (G_T и φ_B)

Условное число	Параметры режима	
	Параметр I	Параметр 2
IФ.Ф	N_e	$\bar{p}_{ст}$
II.Ф	G_T	$\bar{p}_{ст}$
II.Ф	T_r^*	$\bar{p}_{ст}$

В курсовой работе целесообразно задавать $\bar{p}_{ст} = I.$

Таблица П.4.7

Условные числа для ТРДФ и ТРДДФ с тремя регулирующими факторами (G_T и $G_{TФ}$ при $F_{с.кр} / \sqrt{\frac{T_{Ф}^*}{T_r^*}} = const$)

Условное число	Параметры режима	
	Параметр 1	Параметр 2
13.Ф	T_r^*	$T_{Ф}^*$
14.Ф	\bar{n}_{HA}	$T_{Ф}^*$
15.Ф	\bar{n}_{BA}	$T_{Ф}^*$
16.Ф	G_T	$T_{Ф}^*$
17.Ф	ρ	$T_{Ф}^*$

Таблица П.4.8

Условные числа для ТРДФ и ТРДДФ с тремя регулирующими факторами (G_T , $G_{TФ}$, $F_{с.кр}$)

Условное число	Параметры режима		
	Параметр 1	Параметр 2	Параметр 3
18.Ф	T_r^*	$T_{Ф}^*$	\bar{n}_{HA}
19.Ф	T_r^*	$T_{Ф}^*$	\bar{n}_{HA} и ρ
20.Ф	\bar{n}_{HA}	$T_{Ф}^*$	\bar{n}_{BA}

Рекомендации по работе с программой "VSDX"

1. Расчетные точки в таблице П.4.1 необходимо располагать так, чтобы в каждой последующей точке отношение T_r^*/T_{r0}^* было близко к его значению в предыдущей. В первой точке отношение T_r^*/T_{r0}^* должно быть близким к его значению в проектном расчете.
2. Если задание на расчет снято с решения оператором вычислительного центра из-за больших затрат машинного времени, то следует уменьшить количество точек характеристики и повторить расчет.

3. При снятии задания на расчет с решения на ЭВМ из-за возникновения программного прерывания следует тщательно проверить по полученной распечатке исходные данные и, если ошибка не найдена, обратиться к преподавателю или консультанту-программисту кафедры ТИИД.
4. По всем вопросам, связанным с работой в системе коллективного пользования, следует обращаться к обслуживающему персоналу вычислительного центра.

Расшифровка идентификаторов

Идентификатор в расчетке	Обозначения условное обозначение	Наименование параметра	Размерность
Высота MAX	H M_n	И с х о д н ы е д а н н ы е Внешние условия Высота полета Число Маха полета	м к/с
DELTA PH DELTA TH	$\frac{\Delta P_n}{\Delta T_n}$	Отклонение давления от стандартной атмосферы Отклонение температуры от стандартной атмосферы	К
Тяга (мощность)	по результатам проектного термодинамического расчета		
ТЯГА ДА МОЩН ДА	$\frac{P}{N}$	Тяга двигателя Мощность на валу ТВД эквивалентная мощность для ТВД	кН кВт

Идентификатор в распечатке	Общепринятое условное обозначение	Наименование параметра	Размерности
ТГ*	ТГ*	Параметры рабочего процесса	К
ПИ ВЕНТ	$\frac{ТГ^*}{Х_{ВН}}$	Температура газа на входе в турбину ВД	
ПИ КНА	$\frac{ТГ^*}{Х_{КНА}}$	Степень повышения давления в вентиляторе наружного контура ТРД	
ПИ КСА	$\frac{ТГ^*}{Х_{КСА}}$	Степень повышения давления в компрессоре ИД (для обновляемых двигателей $\frac{ТГ^*}{Х_{КНА}}$)	
ПИ КВА	$\frac{ТГ^*}{Х_{КВА}}$	Степень повышения давления в компрессоре СД	
АВУХ КОНТ	ИД	Степень повышения давления в компрессоре ВД	
ТФ / ALFA	ТФ или $\angle \varphi$	Степень двухконтурности На месте этого идентификатора можно записывать или температуру газа в форсажной камере (Б*) или коэффициент избытка воздуха в форсажной камере	

Идентификатор в распечатке	Общепринятое условное обозначение	Наименование параметра	Размерность
Коэффициент полезного действия			
Код ВИНТ	$\eta_{винт}$	КПД воздушного винта ТВД или ТВаД	
Код ВЕНТ	$\eta_{в}^*$	КПД вентилятора	
Код КВА	$\eta_{квд}$	КПД компрессора ВД	
Код КНА	$\eta_{кна}$	КПД компрессора ИД	
		(для одновалвных жвигателей $\eta_{к} = \eta_{кна}$)	
Код КС	$\eta_{с}$	Коэффициент полезного сгорания топлива в основной камере сгорания	
Код КСА	$\eta_{кса}$	КПД компрессора СД	
Код МВА	$\eta_{мва}$	Механический КПД турбины ВД	
Код МНА	$\eta_{мна}$	Механический КПД турбины ИД	
Код МСА	$\eta_{мса}$	Механический КПД турбины СД	
Код РЕА	$\eta_{реа}$	КПД регулятора воздушного винта ТВД	
Код СТ	$\eta_{ст}^*$	КПД свободной турбины	
Код ТРА	$\eta_{тра}^*$	КПД турбины ВД	
		(для одновалвного двигателя $\eta_{т} = \eta_{тра}$)	

Индикатор в расчётах	Общепринятое условное обозначение	Наименование параметра	Размерность
КЛА ТНА	$\gamma_{ТНА}^*$	КЦД турбины НК	
КЛА ТСА	$\gamma_{ТСА}^*$	КЦД турбины СД	
КЛА ФК	$\gamma_{ФК}$	Коэффициент полного сгорания топлива в форсажной камере	
ОЛМ ВА	$1 - \bar{\beta}_{ОЛМ ВА}$	Здесь $\bar{\beta}_{ОЛМ ВА} = \frac{C_{ОЛМ ВА}}{C_{ВЛ}}$ - относительный отбор воздуха на охлаждение турбины СД	
ОЛМ СА	$1 - \bar{\beta}_{ОЛМ СА}$	Здесь $\bar{\beta}_{ОЛМ СА} = \frac{C_{ОЛМ СА}}{C_{ВЛ}}$ - относительный отбор воздуха на охлаждение турбины СД	
ОЛМ НА	$1 - \bar{\beta}_{ОЛМ НА}$	Здесь $\bar{\beta}_{ОЛМ НА} = \frac{C_{ОЛМ НА}}{C_{ВЛ}}$ - относительный отбор воздуха на охлаждение турбины НК	
ЛН СОЛМ	γ_c	Степень понижения давления в сопле	
ЛН СОЛМ1	$\gamma_{с1}$	Коэффициент скорости выходного устройства внутреннего контура ТРД (для одноконтурных двигателей $\gamma_c = \gamma_{с1}$)	
ЛН СОЛМ2	$\gamma_{с2}$	Коэффициент скорости выходного устройства наружного контура ТРД	

Классификатор в расчете	Общепринятое условное обозначение	Наименование параметра	Размерность
LAMBDA 1	λ_1	Приведенная скорость газа на входе в камеру смещенная во внутреннем контуре ТРДСм. Рекомензуемые значения $\lambda_{1I} = 0,3 \dots 0,4$	
LAMBDA CT	$\lambda_{T,cb}$	Приведенная скорость газа на выходе из основной турбины. Рекомендуется $\lambda_{T,cb} = 0,3$	
LAMBDA ФК	$\lambda_{Фк}$	Приведенная скорость газа на входе в форсажную камеру. Рекомендуется $\lambda_{Фк} = 0,18 \dots 0,25$	
ОМЕГА	ω	Коэффициент пересчета реактивной тяги ТВД в эквивалентную мощность на валу винта $\omega = N_{рс} / P_{рс}$	кВт/лн
SIGMA 1	σ_1	Коэффициент восстановления полного давления на участке ст входа из турбины до входа в камеру смещения (для одноконтурных двигателей -- до входа в выходное устройство)	
SIGMA 0	$\sigma_{0,01}$	Коэффициент восстановления полного давления в наружном канале ТРД	

Идентификатор в распечатке	Общепринятое условное обозначение	Наименование параметра	Размерность
SIGMA ВУХ	$\sigma_{вух}$	Коэффициент восстановления полного давления в выходном устройстве ТВаД	
SIGMA ВХ	$\sigma_{вх}$	Коэффициент восстановления полного давления на входе в двигатель	
SIGMA КС	$\sigma_{кс}$	Коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания	
SIGMA СТ	$\sigma_{тсб}$	Коэффициент восстановления полного давления в переходнике к свободной турбине	
SIGMA ЦК	$\sigma_{ц}$	Коэффициент гидравлических потерь в форзацной камере	
A1BA	A1BA	Результаты расчета	
A1CA	A1CA	Коэффициент расхода турбины ВД; определяет ее пропускную способность	
A1HA	A1HA	Коэффициент расхода турбины СД	
A1CT	A1CT	Коэффициент расхода турбины НД	
	A1CB	Коэффициент расхода свободной турбины	

Идентификатор в распечатке	Общепринятое условное обозначение	Наименование параметра	Размерность
МОЩН. СТ МОЩН. ЭКВ	N_e N_z	Мощность на валу ТВАД Эквивалентная мощность ТВД	кВт кВт
ОБ ВА	\bar{n}_{BA}	Физическая условная частота вращения ротора ВД $\bar{n}_{BA} = \bar{n}_{BA, пр. вх. вА} \sqrt{\frac{T_{вх. вА}^*}{988}}$	
ОБ ВА ПР	$\bar{n}_{BA, пр. вх. вА}$	Приведенная условная частота вращения ротора ВД, определенная по характеристике компрессора (в исходной расчетной точке проектного термодинамического расчета принимается $\bar{n}_{BA, пр. вх. вА} = 1$)	
ОБ НА	$\bar{n}_{НА}$	Физическая частота вращения ротора НД $\bar{n}_{НА} = \bar{n}_{НА, пр} \sqrt{\frac{T_{НА}^*}{988}}$	
ОБ НА ПР	$\bar{n}_{НА, пр}$	Приведенная условная частота вращения ротора НД, определенная по характеристике компрессора (в исходной расчетной точке проектного термодинамического расчета принимается $\bar{n}_{НА, пр} = 1$)	

Идентификация в расчётах	Общепринятое условное обозначение	Наименование параметра	Размерность
06 СА	\bar{P}_{CA}	Физическая условная частота вращения ротора СА $\bar{P}_{CA} = \bar{P}_{CA \text{ по } \omega_{CA}} \sqrt{\frac{I_{\omega_{CA}}}{\rho_{\text{рт}}}}$	
06 ВА ПР	$\bar{P}_{\text{ВА ПР } \omega_{\text{ВА}}}$	Приведенная условная частота вращения ротора ВА, определенная по характеристистике компрессора (в исходной расчетной точке проектного термодинамического расчета принимается $\bar{P}_{\text{ВА по } \omega_{\text{ВА}}} \text{ I}$)	
06 СТ	$\bar{P}_{\text{ТСВ}}$	Физическая относительная частота вращения ротора свободной турбины $\bar{P}_{\text{ТСВ}} = \bar{P}_{\text{ТСВ}} / \bar{P}_{\text{ТСВ}0}$	
III СОПЛА 1	λ_{CT}	Степень понижения давления в выходном устройстве внутреннего контура (для одноконтурных двигателей) $\lambda_{CT} = \lambda_{CT}$	
III СОПЛА 2	λ_{CT}^*	Степень понижения давления в выходном устройстве наружного контура	
III СТ	$\lambda_{\text{ТСВ}}^*$	Степень понижения давления в свободной турбине	
III ТВА	$\lambda_{\text{ТВА}}^*$	Степень понижения давления в турбине ВД (для одноступенчатых двигателей) $\lambda_{\text{Т}}^* = \lambda_{\text{ТВА}}^*$	

Продолжение табл. П. 4.9

Код измерительного устройства	Общепринятое условное обозначение	Наименование параметра	Размерность
ПН ТНА	$T_{ТНА}^*$	Степень понижения давления в турбине НК	
ПН ТСА	$T_{ТСА}^*$	Степень понижения давления в турбине СД	
Т* АЕНТ	$T_{КА}^*$	Температура воздуха на выходе из вентилятора в наружном контуре	К
Т* КВД	T_K^*	Температура воздуха на выходе из компрессора НК	К
Т* КНА	$T_{КНА}^*$	Температура воздуха на выходе из компрессора НК	К
Т* КСА	$T_{КСА}^*$	Температура воздуха на выходе из компрессора СД	К
Т* СМ	$T_{СМ}^*$	Температура газа на выходе из камеры сгорания	К
Т* СТ	$T_{ТГВ}^*$	Температура газа на выходе из свободной турбины	К
Т* ТАД	$T_{ТАД}^*$	Температура газа на выходе из турбины ВД	К
Т* ТСА	$T_{ТСА}^*$	Температура газа на выходе из турбины СД	К
Т* ТНА	T_T^*	Температура газа на выходе из турбины НК	К
Т* Т 1	P_1	Давление воздуха перед дросселем	МН
Т* Т 0	P_0	Давление воздуха перед дросселем	МН

Идентификатор в расписатке	Общепринятое условное обозначение	Наименование параметра	Размерность
ТЯГА ВИНТ.	$P_{винт}$	Тяга воздушного винта ТВД	лб
ТЯГА СУМ	P	Суммарная тяга двигателя	лб
УДА РАСК	$S_{уд}, S_e, S_a$	Удельный расход топлива, отнесенный к тяге. В случае расчета ТВД и ТВАд на месте этого идентификатора печатается удельный расход, отнесенный к мощности	л/лбч
ПЛОЩАДЬ 1	$F_{с1}$	Площадь критического сечения выходного устройства в ТРД, ТРДБ, ТРДБМ, ТРДБСМ и внутреннего контура ТРДД, а также площадь выходного сечения ТВД и ТВАд	см ²
ПЛОЩАДЬ 2	$F_{с2}$	Площадь критического сечения входного устройства в наружного контура ТРДД	см ²
ПЛОЩАДЬ РЕГ	$F_{срег}$	Площадь выходного регулируемого сечения сопла двигателя с форсажной камерой при полном расширении	см ²
ПЛОЩАДЬ	$F_{сфк}$	Площадь сечения форсажной камеры	см ²

Идентификатор в расчётке	Общепринятое условное обозначение	Наименование параметра	Размерность
СВКВА ПР	$G_{пр. вх. вл}$	Приведенный расход воздуха на входе в компрессор ВД $G_{пр. вх. вл} = G_{вх. вл} \frac{101,3}{p^*} \sqrt{\frac{T_{вх. вл}^*}{p_{вх. вл}^*}}$	кг/с
СВКСА ПР	$G_{пр. вх. са}$	Приведенный расход воздуха на входе в компрессор СД $G_{пр. вх. са} = G_{вх. са} \frac{101,3}{p^*} \sqrt{\frac{T_{вх. са}^*}{p_{вх. са}^*}}$	кг/с
СВСИМ	G_{Σ}	Физический суммарный расход воздуха через внут-ренний и наружный контуры ТРД (для одноконтурных двигателей - расход воздуха через лопатки)	кг/с
СВСИМ ПР	$G_{\Sigma пр}$	Приведенный суммарный расход воздуха через внут-ренний и наружный контуры ТРД (для одноконтурных двигателей - приведенный расход воздуха на входе в компрессор) $G_{\Sigma пр} = G_{\Sigma} \frac{101,3}{p^*} \sqrt{\frac{T_{н}^*}{p_{н}^*}}$	кг/с

Сводные таблицы

Идентификатор в распечатке	Соблюдение условное обозначение	Наименование параметра	Размерность
GT 6AL	G _T	Часовой расход топлива	кг/ч
PH	P _H	Давление атмосферного воздуха	кПа
TH	T _H	Температура атмосферного воздуха	K

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
Рекомендации по составлению введения к курсовой работе.....	4
1. ВЫБОР ЗАКОНА И ПРОГРАММЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	4
2. ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ УЗЛОВ ГТД ЗАДАННОГО ТИПА И СХЕМЫ	5
2.1. Уравнение для линии совместной работы, его анализ	5
2.2. Расчет линии совместной работы	6
3. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ	7
3.1. Методика расчета	7
3.2. Результаты расчета, их анализ	7
Библиографический список	8
Приложение 1. Основные требования к оформлению курсовой работы	9
Приложение 2. Типовые характеристики компрессоров.....	11
Приложение 3. Номограмма для определения ξ_k^*	17
Приложение 4. Порядок работы с программой "VSDX" расчета характеристик ГТД на ЭВМ	18

**ВЫБОР ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ,
АНАЛИЗ СОБЕСТНОЙ РАБОТЫ УЗЛОВ
И РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ГТД**

Составители: Б о ч к а р е в Сергей Константинович,
К у л а г и н Виктор Владимирович,
К у з ь м и ч е в Венедикт Степанович,
Л о м а к и н Виктор Борисович

Редактор Д.Я.Ч е г о д а е в а
Техн. редактор Н.М.К а л е н ю к
Корректор Д.Я.Ч е г о д а е в а

Подписано в печать 4.04.90 г. формат 60x84¹/16.
Бумага оберточная. Печать офсетная. Усл.п.л. 2,32.
Усл.кротт. 2,4. Уч.-изд.л. 2,1. Т. 100 экз.
Заказ ~ 195. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева,
443086 Куйбышев, Московское шоссе, 34.

Участок оперативной полиграфии Куйбышевского авиационного
института. 443001 Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.