

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РСФСР

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

АЛГОРИТМЫ ПРОГРАММ И ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ
РАСЧЕТОВ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ ПРИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ
ПРОЕКТИРОВАНИИ ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ

Утверждено редакционно-издательским советом института в качестве методических указаний по курсу
"Теория и расчет лопаточных машин"

Куйбышев 1984

УДК 629.7.036

Приводятся необходимые соотношения и даются указания, позволяющие грамотно и с достаточным пониманием выполнять расчеты на ЭВМ. Алгоритмы представлены в виде, удобном для составления отдельных программ и подпрограмм путем выделения общих и специальных частей методик расчета. Даются рекомендации по выполнению расчетов с помощью ЭВМ.

Методические указания предназначены для студентов старших курсов факультета (спец. 0537), выполняющих курсовую работу или дипломный проект по курсу "Теория и расчет лопаточных машин".

Составитель **Е.Д. Стенькин**

Рецензент **А.М. Идельсон**

1. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭВМ

Назначение курсовой работы по курсу "Теория и расчет лопаточных машин" состоит в изучении студентами методов проектирования и освоения ими основных этапов проектирования как турбокомпрессора, так и отдельных его элементов.

Пособия и другая литература, имеющиеся в институте, позволяют студентам грамотно и на современном техническом уровне выполнять курсовую работу. Этому способствуют систематические консультации и помощь, оказываемые студентам преподавателями. При выдаче заданий читаются установленные лекции, в которых разъясняются сущность, структура и цели задания, особенности работы по пособиям, рассматриваются часто встречающиеся ошибки. Для удобства пользования пособиями составлены методические указания отдельно для проектирования компрессора и турбины. Разъясняется, как должна составляться пояснительная записка по курсовой работе.

Опыт показывает, что студент, систематически занимающийся курсовой работой и тщательно прорабатывающий пособия и соответствующую литературу, работу выполняет вовремя или даже досрочно и защищает ее весьма успешно. В то же время опыт показывает, что трудоемкость работы сравнительно велика, и поэтому нет возможности поиска оптимальных решений, т.е. расчета нескольких вариантов. Для создания такой возможности предусматривается применение ЭВМ. Использование ЭВМ определяет необходимость разработки соответствующих алгоритмов расчета с однозначной последовательностью и аналитическими зависимостями вместо обычно применяемых графиков. Данные методические указания составлены с учетом использования ЭВМ.

2. ПРИНЦИПЫ ОБУЧЕНИЯ И ВЫПОЛНЕНИЯ СТУДЕНТАМИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

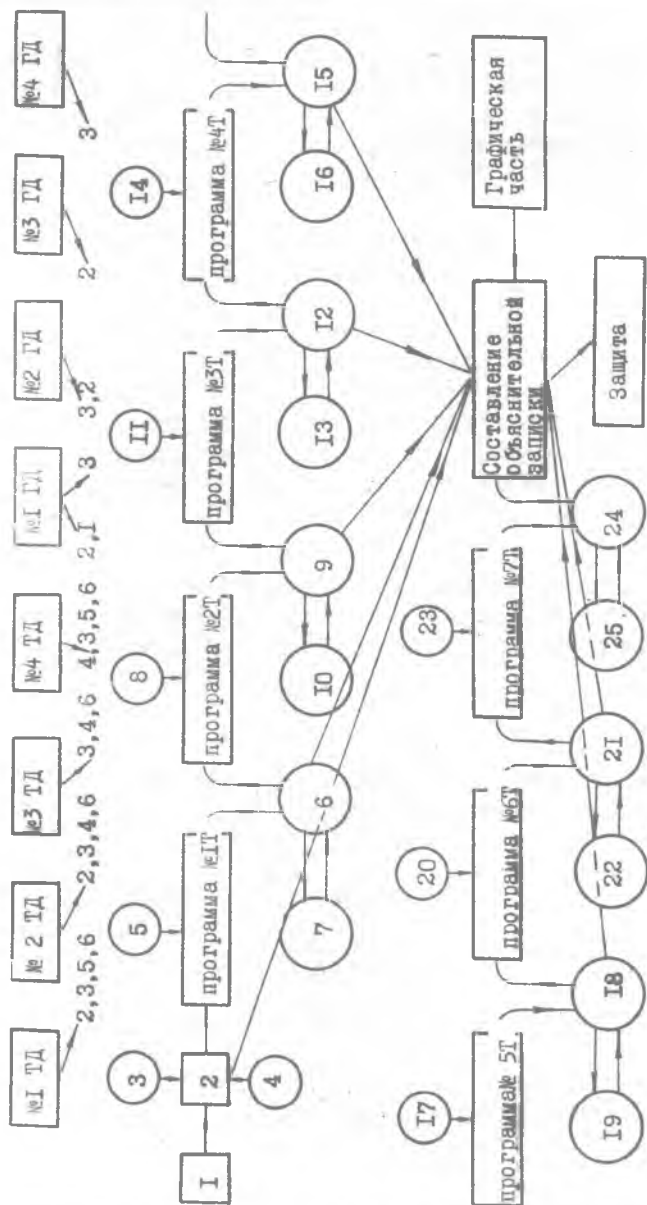
Сразу же необходимо отметить, что ЭВМ используется как инструмент (подобно тому, как ранее использовалась логарифмическая линейка) для выполнения отдельных трудоемких частей работы. Такой принцип принят при составлении отдельных программ. При переходе от предыдущей к последующей программе отдельные исходные параметры получаются как результаты расчета по преды-

душей программе ряда вариантов, из которых на основании логического анализа выбирается оптимальный. Студент должен самостоятельно выбрать основные геометрические и газодинамические параметры, характеризующие форму проточной части, течение на входе и на выходе (в I -м приближении) из турбины и другие исходные параметры. После выполнения расчетов по одной из программ следует проанализировать результаты расчета и убедиться, что они соответствуют рекомендациям, изложенным в пособии. В случае необходимости расчет повторяется с другим вариантом сочетания исходных параметров. В том и состоит преимущество ЭВМ, что она позволяет рассчитывать различные варианты при малой затрате времени и труда. Целесообразно заранее подготовить известные исходные параметры для всех программ и затем их дополнять остальными исходными параметрами, которые получаются как результаты расчета выбранного варианта по предыдущим программам. Студенту следует внимательно относиться к составлению исходных параметров и заполнению соответствующих бланков. В процессе выполнения работы рекомендуется материалы по каждому этапу сразу оформлять окончательно для их включения в пояснительную записку.

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

При выполнении газодинамического расчета турбины приходится часто повторять расчет процесса расширения как во всей турбине, так и в отдельных ступенях статических параметров, чисел λ или газодинамических функций числа λ . В связи с этим оказалось целесообразным выделить термодинамические подпрограммы № 1 ТД, № 2 ТД, № 3 ТД, № 4 ТД и газодинамические подпрограммы № 1 ГД, № 2 ГД, № 3 ГД, № 4 ГД (их названия указываются в содержании). На рисунке схематично приводится структура работы. Она содержит следующие операторы и предусматривает такие связи. После получения задания 1 студент рассчитывает основные параметры турбокомпрессора 2, подбирая и изучая литературу по методам расчета 3 и особенностям работы на ЭВМ 4. Выполняется анализ результатов расчета и подготовка основных и дополнительных исходных параметров 5 для расчета предварительных размеров проточной части турбины по программе № 1 Т. В этой, как и в других программах, используются термодинамические и газодинамические подпрограммы. После получения по программе № 1 Т результатов 5, выполняется их анализ 6, который согласуется с преподавателем 7 и затем

ТЕРМО- И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОДПРОГРАММЫ



строится график проточной части турбины. Параметры, полученные в расчете 2 и по программе № I T, оформляются начисто в виде таблиц и соответствующего текста для их включения в пояснительную записку. На схеме эта процедура показана стрелками. Последовательность действий по программам № 2 T, 3 T, 4 T, 5 T, 6T, 7T такая же, как и по программе № IT. Соответственно, на рисунке операторы имеют следующее содержание:
 3,5,8,11,14,17,20,23 — составление дополнительных исходных параметров;
 6,9,12,15,18,21,24 — анализ результатов расчета;
 7,10,13,16,19,22,25 — согласование выбранного варианта расчета с преподавателем.
 Стрелки, исходящие из операторов 2,6,9,12,15,18,21, означают окончательное оформление материалов для пояснительной записки. Алгоритмы, разработанные для программ, основаны на методических разработках и рекомендациях, изложенных в пособии [1]. В процессе выполнения работы обязательно руководствоваться этим пособием, и особенно при переходе от одной программы к другой и выборе нужного варианта расчета.

4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ПОДПРОГРАММА № I TД.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНТАЛЬПИИ ГАЗА i_d ПО ЗАДАНЫМ ТЕМПЕРАТУРЕ T И ВЕЛИЧИНЕ, ОБРАТНОЙ КОЭФФИЦИЕНТУ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА $\frac{1}{\alpha}$

Вычисляется коэффициент состава газа

$$B = \frac{1 + \frac{\alpha_0}{1/\alpha}}{1 + \frac{\alpha_0}{1/\alpha}},$$

где для углеводородных топлив $\alpha_0 = 14,795$.

Вычисляются энтальпии для воздуха ($\alpha = \infty$) и стехиометрической смеси газа ($\alpha = 1$) [2]:

$$i_{\infty} = \left\{ \left[(0,3869 \cdot 10^{-4} T - 0,24661) \cdot 10^{-3} T + 0,52835 \right] \cdot 10^{-3} T - 0,24746 \right\} \cdot 10^{-4} T + 0,24242 T ;$$

$$i_{(1)} = \left\{ \left[(0,29886 \cdot 10^{-4} T - 0,1887) \cdot 10^{-3} T + 0,36978 \right] \cdot 10^{-2} T + 0,41667 \right\} \cdot 10^{-5} T + 0,24303 T ,$$

а затем энтальпия газа заданного состава $i_{\alpha} = (1-B)i_{\infty} + B i_{(1)}$.

5. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ПОДПРОГРАММА № 2 ТД.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ Π - ФУНКЦИИ ПО ЗАДАНЫМ ВЕЛИЧИНАМ T И $\frac{1}{\alpha}$

Вычисляются коэффициент состава газа $B = \frac{1 + \frac{L_0}{\alpha}}{1 + \frac{L_0}{1/\alpha}}$

и относительная температура $\bar{T} = \frac{T}{273,16}$.

Рассчитывается Π - функция для воздуха ($\alpha = \infty$) и стехиометрической смеси газа ($\alpha = 1$) [2]:

$$\ln \Pi_{\infty} = \left\{ \left[(0,39248 \cdot 10^{-1} \bar{T} - 0,97709) 10^{-1} \bar{T} + 0,86234 \right] 10^{-1} \bar{T} - 0,19719 \right\} \bar{T} + 3,5366 \ln \bar{T} + 0,120334 ;$$

$$\ln \Pi_{(1)} = \left\{ \left[(0,30234 \cdot 10^{-1} \bar{T} - 0,74557) 10^{-1} \bar{T} + 0,60187 \right] \bar{T} + 0,33111 \right\} 10^{-1} \bar{T} + 3,5358 \ln \bar{T} - 0,86145 \cdot 10^{-1},$$

а затем Π - функция газа заданного состава

$$\ln \Pi_{\alpha} = (1-B) \ln \Pi_{\infty} + B \ln \Pi_{(1)}.$$

6. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ПОДПРОГРАММА № 3 ТД.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА T ПО ЗАДАНЫМ ВЕЛИЧИНАМ i_{α} И $\frac{1}{\alpha}$

Вычисляется коэффициент состава газа $B = \frac{1 + \frac{L_0}{\alpha}}{1 + \frac{L_0}{1/\alpha}}$.

В первом приближении принимается равенство

$$i_{\infty}^{(1)} = i_{\alpha}$$

и вычисляется температура [2]

$$T_{\alpha}^{(1)} = \left\{ \left[(-0,11904 \cdot 10^{-3} i + 0,18963) 10^{-2} i - 0,97119 \right] 10^{-2} i + 0,73877 \right\} 10^{-3} i + 4,17806 \left\} i .$$

В m -ых приближениях вычисляются энтальпии для воздуха ($\alpha = \infty$) и газа стехиометрического состава ($\alpha = I$):

$$i_{\infty}^{(m)} = \left[\left\{ \left[\left(0,3869 \cdot 10^{-4} T - 0,24661 \right) 10^{-3} T + 0,52835 \right] 10^{-3} T - 0,24746 \right\} 10^{-4} T + 0,24242 \right] T;$$

$$i_{(I)}^{(m)} = \left[\left\{ \left[\left(0,29886 \cdot 10^{-4} T - 0,1887 \right) 10^{-3} T + 0,36978 \right] 10^{-2} T + 0,41667 \right\} 10^{-5} T + 0,24303 \right] T.$$

Рассчитывается энтальпия газа заданного состава m -го приближения и температура $m+I$ -го приближения

$$i_{\alpha}^{(m)} = (1-B) i_{\infty}^{(m)} + B i_{(I)}^{(m)}; \quad T_{\alpha}^{(m+1)} = \frac{i_{\alpha}^{(m)}}{i_{\alpha}^{(m)}} T_{\alpha}^{(m)}.$$

Вычисляется величина относительной разности температур в соседних приближениях и сравнивается с допустимой величиной

$$\Delta \bar{T}_{\alpha}^{(m)} = \frac{T_{\alpha}^{(m+1)} - T_{\alpha}^{(m)}}{T_{\alpha}^{(m+1)}}; \quad \Delta_T = \left| \Delta \bar{T}_{\alpha}^{(m)} \right| - \delta_T,$$

где δ_T - допустимая погрешность, например, $\delta_T = 0,5 \cdot 10^{-3}$.

Если получено $\Delta_T \leq 0$, то расчет закончен.

Если же $\Delta_T > 0$, то повторяется расчет с вычисления энтальпий

$i_{\infty}^{(m+1)}$ и $i_{(I)}^{(m+1)}$ для температуры $T_{\alpha}^{(m+1)}$.

7. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ПОДПРОГРАММА № 4 ТД.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА T ПО ЗАДАНЫМ ВЕЛИЧИНАМ Π_{α} И $\frac{1}{\alpha}$

Вычисляется коэффициент состава газа $B = \frac{1 + \frac{1}{\alpha}}{1 + \frac{1}{\alpha}}$.

В первом приближении принимается равенство $\Pi_{\infty}^{(1)} = \Pi_{\alpha}$ и вычисляется относительная температура

$$\bar{T}_{\alpha}^{(1)} = \left(\left\{ \left[\left(-0,7847 \cdot 10^{-2} \ln \Pi + 0,23009 \right) \cdot 10^{-1} \ln \Pi - 0,22460 \right] \ln \Pi + 0,44078 \right\} \ln \Pi + 0,89855 \right) 10^{-2} \ln \Pi + 1) \Pi^{0,274}.$$

В m -ых приближениях вычисляются

Π - функции для воздуха ($\alpha = \infty$) и газа стехиометрического состава ($\alpha = I$):

$$\ln \pi_{\infty}^{(m)} = 3,5366 \ln \bar{T} + 0,120334 + \left\{ \left[(0,39248 \cdot 10^{-1} \bar{T} - 0,97709) \cdot 10^{-1} \bar{T} + 0,86234 \right] \cdot 10^{-1} \bar{T} - 0,19719 \right\} \bar{T};$$

$$\ln \pi_{(1)}^{(m)} = 3,5358 \ln \bar{T} - 0,86145 \cdot 10^{-1} + \left\{ \left[(0,30234 \cdot 10^{-1} \bar{T} - 0,74557) \cdot 10^{-1} \bar{T} + 0,60187 \right] \bar{T} + 0,33111 \right\} \cdot 10^{-1} \bar{T}.$$

Рассчитывается π -функция газа заданного состава m -го приближения и температура $m+1$ -го приближения:

$$\ln \pi_{\alpha}^{(m)} = (1-B) \ln \pi_{\infty}^{(m)} + B \ln \pi_{(1)}^{(m)};$$

$$\bar{T}_{\alpha}^{(m+1)} = \bar{T}_{\alpha}^{(m)} \left[1 + 0,262 \left(1 - \frac{\pi_{\alpha}^{(m)}}{\pi_{\alpha}^{(m)}} \right) \right].$$

Вычисляется величина относительной разности температур в соседних приближениях и сравнивается с допустимой величиной

$$\Delta \bar{T}_{\alpha}^{(m)} = \frac{\bar{T}_{\alpha}^{(m+1)} - \bar{T}_{\alpha}^{(m)}}{\bar{T}_{\alpha}^{(m+1)}}; \quad \Delta_T = \left| \Delta \bar{T}_{\alpha}^{(m)} \right| - \delta_T,$$

где δ_T - допустимая погрешность, например, $\delta_T = 0,5 \cdot 10^{-3}$.

Если получено $\Delta_T \leq 0$, то вычисляется температура $T=273,16$ и на этом расчет заканчивается.

Если же $\Delta_T > 0$, то повторяется расчет с вычисления величин $\pi_{\infty}^{(m+1)}$ и $\pi_{(1)}^{(m+1)}$ для относительной температуры $\bar{T}_{\alpha}^{(m+1)}$.

8. ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ПОДПРОГРАММА № I ГД.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДНОЙ ФУНКЦИИ $q(\lambda)$ ПО ЗАДАНЫМ ЧИСЛУ λ И ПОКАЗАТЕЛЮ ИЗОЭНТРОПЫ κ

Имеется исходная формула $q = q(\lambda) = \lambda \left(\frac{\kappa+1}{2} - \frac{\kappa-1}{2} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$.

Разложение функции q в ряд Тейлора приводит к выражению [3]

$$q = \lambda \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{n!}{2^n} \cdot \frac{(1 - \frac{n-1}{n} \kappa)}{2^n} (\lambda^2 - 1)^n \right],$$

в котором имеется следующая связь между предыдущим и последующими членами ряда:

$$Q_n = - \frac{1 - \frac{n-1}{n} \kappa}{2} (\lambda^2 - 1) Q_{n-1}.$$

Нулевой член ряда имеет величину $Q_0 = 1$. Задавая последо-

вательно значения $n = 1, 2, 3, \dots$, вычисляются величины:

$$\delta_n = \frac{\lambda^2 - 1}{2} \left(1 - \frac{n-1}{n} \kappa\right); \quad a_n = -a_{n-1} \delta_n;$$

$$S = \sum_1^n a_n; \quad |\Delta a| = |a_n - a_{n-1}|;$$

$$\delta a = |\Delta a| - \varepsilon_a, \quad \text{где } \varepsilon_a - \text{допустимая погрешность}$$

вычисления суммы, например, $\varepsilon_a = 5 \cdot 10^{-4}$.

Если получено $\delta a \geq 0$, то значение n увеличивается на 1, т.е. задается $n^{(i+1)} = n^{(i)} + 1$ и повторяется расчет с вычисления коэффициента δ_n .

Если же получено $\delta a < 0$, то вычисляется искомая функция

$$q = \lambda(1+S)$$

9. ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ПОДИПРОГРАММА № 2 ГД.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ $\mathcal{J}(\lambda)$ ПО ЗАДАННОМУ ЧИСЛУ λ И ПОКАЗАТЕЛЮ ИЗОЭНТРОПИИ κ

Имеется исходная формула
$$\mathcal{J} = \mathcal{J}(\lambda) = \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+2} \lambda^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}.$$

Разложение функции \mathcal{J} в ряд Маклорена приводит к выражению [3]

$$\mathcal{J} = 1 + \sum_1^n (-1)^n \frac{\binom{n}{1} \left(\frac{n-1}{n} - \frac{n-2}{n} \kappa\right)}{(\kappa+1)^n} \lambda^{2n},$$

в котором имеется следующая связь между предыдущим и последующими членами ряда:

$$a_n = -\frac{\frac{n-1}{n} - \frac{n-2}{n} \kappa}{\kappa+1} \lambda^2 a_{n-1}.$$

Нулевой член ряда имеет величину $a_0 = 1$.

Задавая последовательно значения $n = 1, 2, 3, \dots$, вычисляются

величины:

$$\delta_n = \frac{\frac{n-1}{n} - \frac{n-2}{n} \kappa}{\kappa+1}; \quad a_n = -a_{n-1} \delta_n;$$

$$S = \sum_1^n a_n; \quad |\Delta a| = |a_n - a_{n-1}|;$$

$\delta a = |\Delta a| - \varepsilon_a$, где ε_a - допустимая погрешность вычисления суммы, например, $\varepsilon_a = 5 \cdot 10^{-4}$. Если получается $\delta a \geq 0$, то значение n увеличивается на 1, т.е. задается

$$n^{(i+1)} = n^{(i)} + 1,$$

и повторяется расчет с вычислением коэффициента δ_n .
Если же получено $\delta_n < 0$, то вычисляется искомая функция

$$\pi = 1 + S.$$

10. ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ПОДПРОГРАММА № 3 ГД.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА λ ПО ЗАДАННОЙ ФУНКЦИИ $q(\lambda)$ И
ПОКАЗАТЕЛЮ ИЗОЭНТРОПИИ k (ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ $\lambda < 1$)

Итерационная формула
$$\lambda^{(i+1)} = q \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \frac{1}{[\varepsilon(\lambda)]^{(i)}}.$$

Формула с разложением функции $\varepsilon(\lambda)$ в ряд Тейлора

$$\lambda^{(i+1)} = \frac{q}{\left[1 + \sum_{n=1}^n a_n \right]^{(i)}},$$

где выражение для коэффициента a_n приводится в подпрограмме
№ 1 ГД.

Принимается $\lambda^{(1)} = q.$

Затем обращается к подпрограмме № 1 ГД для вычисления

$$S^{(i)} = \left(\sum_{n=1}^n a_n \right)^{(i)}$$

Вычисляется число λ в $i+1$ -м приближении

$$\lambda^{(i+1)} = \frac{q}{1+S}.$$

Рассчитывается абсолютная разность чисел λ в соседних
приближениях и она сравнивается с допустимой погрешностью

$$|\Delta\lambda| = |\lambda^{(i+1)} - \lambda^{(i)}|; \quad \delta\lambda = |\Delta\lambda| - \varepsilon_\lambda,$$

где ε_λ - допустимая погрешность, например, $\varepsilon_\lambda = 5 \cdot 10^{-4}$.

Если получено $\delta\lambda \geq 0$, то расчет повторяется с обращения к
подпрограмме № 1 ГД, задавая $\lambda = \lambda^{(i+1)}$. Если же получено

$\delta\lambda < 0$, то расчет закончен.

11. ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ПОДПРОГРАММА № 4 ГД.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА λ ПО ЗАДАННОЙ ФУНКЦИИ $\pi(\lambda)$ И
ПОКАЗАТЕЛЮ ИЗОЭНТРОПИИ k

Имеется исходная формула
$$\lambda = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left(1 - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right)}.$$

Формула с учетом разложения величины $\pi^{\frac{k-1}{k}}$ в ряд Маклорена

принимает вид [3]

$$\lambda = \sqrt{\frac{\kappa+1}{\kappa-1} \sum_1^n (-1)^n \prod_1^n \frac{\frac{\kappa-1}{\kappa} - (n-1)}{n} (1-\pi)^n},$$

где имеется следующая связь между предыдущим и последующим членами ряда:

$$a_n = -\frac{\frac{\kappa-1}{\kappa} - (n-1)}{n} (1-\pi) a_{n-1}.$$

Нулевой член ряда имеет величину $a_0 = 1$.

Задавая последовательно значения $n = 1, 2, 3, \dots$, вычисляются величины:

$$b_n = \frac{\frac{\kappa-1}{\kappa} - (n-1)}{n} (1-\pi); \quad a_n = -a_{n-1} b_n;$$

$$S = \sum a_n; \quad |\Delta a| = |a_n - a_{n-1}|;$$

$\delta a = |\Delta a| - \varepsilon_a$, где ε_a - допустимая погрешность вычисления суммы, например, $\varepsilon_a = 5 \cdot 10^{-4}$.

Если получается $\delta a \geq 0$, то значение n увеличивается на 1, т.е. задается $n^{(i+1)} = n^{(i)} + 1$ и повторяется расчет с вычисления коэффициента b_n .

Если же получено $\delta a < 0$, то вычисляется искомое число

$$\lambda = \sqrt{\frac{\kappa+1}{\kappa-1} S}.$$

12. ПРОГРАММА № 1 Т. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБИНЫ

Исходные параметры (данные)

p_3^*, T_3^*, λ_3 - параметры газа на входе;

$G_{Г3}$ - расход газа на входе, кг/с;

$D_{Зср}$ - средний диаметр на входе (ориентировочно), м;

$p_4^*, T_4^*, \lambda_4, \alpha_4$ - параметры на выходе;

$G_{Г4}$ - расход газа на выходе, кг/с;

$D_{4ср}$ - средний диаметр на выходе (ориентировочно), м;

$U_{4ср}$ - окружная скорость на среднем диаметре на выходе, м/с;

L_T^* - действительная работа всего каскада турбины;

$\psi_{ср}^*$ - средний коэффициент нагрузки ступеней (предварительно);

$\eta_{ст.5}^*$ - средний изоэнтальпический КПД ступени;

$\sigma_{ср}$ - степень реактивности на среднем радиусе;

$\delta_{ос} = \frac{\delta_{ос}}{e}$ - средняя величина относительного осевого зазора;

$\delta_{рк}$ - коэффициент потерь, вторичных и в радиальном зазоре;

Φ - коэффициент формы лопатки;

ρ_M - удельная масса материала лопатки, кг/м³

Метод и алгоритм расчета

1. Обращаются к подпрограмме № I ГД для вычисления функции по заданному числу λ и показателю $K = I, 33$.

Вычисляются кинематические и геометрические параметры на выходе из турбины: $\alpha_{кр4} = 18,1 \sqrt{T_4^*}$; $C_4 = \lambda_4 \alpha_{кр4}$; $C_{4a} = C_4 \sin \alpha_4$;

$$f_{4a} = \frac{2,525 \cdot 10^2 G_{г4} \sqrt{T_4^*}}{\rho_4^* q_4 \sin \alpha_4}, \text{ м}^2 \quad (\text{где } \rho_4^* \text{ в кПа});$$

$$\theta_{р4} = \frac{D_{4ср}}{h_4} \quad (\text{где вначале принимается } D_{4ср} = D'_{4ср});$$

$$\bar{C}_{2a} \equiv \bar{C}_{4a} = \frac{C_{4a}}{U_{4ср}} \quad (\text{где вначале принимается } U_{4ср} = U'_{4ср});$$

$$\bar{H}_{тн} = 2(1 - q_{ср}) + 2 \bar{C}_{2a} \operatorname{ctg} \alpha_2; (\alpha_2 \equiv \alpha_4); G_p = 0,204 \cdot 10^{-7} \rho_M U_{4ср}^2 \frac{\Phi}{\theta_{р4}} \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2}$$

2. Рассчитываются коэффициент нагрузки, работа последней ступени и работа, приходящаяся на остальные ступени:

$$\psi_z^* = \frac{U}{C_0} \sqrt{0,5 \frac{\eta_{ст.с}}{\bar{H}_{тн} \delta_{рк}}}; \quad L_{zs}^* = \frac{U_{4ср}^2}{2 \psi_z^{*2}} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}; \quad L_{zs}^* = L_{zs}^* \eta_{ст.с}^*$$

$$L_{тс}^*(z-1) = L_{т}^* - L_{zs}^* \Phi$$

3. Если получается величина $L_{тс}^*(z-1) < 0$, то это означает, что турбина одноступенчатая ($z = I$), и поэтому соответственно уточняются следующие величины:

$$U_{4ср} = U'_{4ср} \sqrt{L_{zs}^* \Phi / L_{т}^*}; \quad D_{4ср} = D'_{4ср} U_{4ср} / U'_{4ср}; \quad L_{zs}^* = L_{т}^* / \eta_{ст.с}^*;$$

$$l_4 = h_4 = f_{4a} / \pi D_{4ср}; \quad \theta_{р4} = D_{4ср} / h_4;$$

$$G_p = 0,204 \cdot 10^{-7} \rho_M U_{4ср}^2 \frac{1}{\theta_{р4}} \Phi \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2}$$

и затем переходят к определению параметров в 3 сечении (п.5).

4. Если же получена величина $L_{тс}^*(z-1) \geq 0$, то вычисляются величины

$$U'_{3ср} = U_{4ср} \frac{D_{3ср}}{D_{4ср}}; \quad z' - 1 = \frac{2 \psi_{3ср}^{*2}}{U_{3ср}^2} \frac{L_{тс}^*(z-1)}{\eta_{ст.с}^*}$$

3. При этом, если получается величина $\mathcal{Z}' - I < 0,5$, следует принимать $\mathcal{Z} = I$, вычислять $U_{4cp} = U'_{4cp} \sqrt{1 + (\mathcal{Z}' - I)}$ и повторять п.3 с вычисления диаметра D_{4cp} .

Если же получена величина $\mathcal{Z}' - I > 0,5$, то она округляется до ближайшего целого числа $\mathcal{Z} - I$ и вычисляются величины

$$U_{3cp} = U'_{3cp} \sqrt{\frac{\mathcal{Z}' - I}{\mathcal{Z} - I}}; \quad D_{3cp} = D'_{3cp} \frac{U_{3cp}}{U'_{3cp}}.$$

7. Обращаются к подпрограмме № I ГД для вычисления функции Q_3 по заданному числу λ_3 и показателю $K_2 = I,33$.

Вычисляются кинематические и геометрические параметры на входе в турбину:

$$f = \frac{2,52540^2 G_{ГЗ} \sqrt{T_3^*}}{\rho_3^* Q_3 \sin \alpha_3}, \text{ м}^2 \quad (\text{где } \rho_3^* \text{ в гПа);}$$

$$l_3 = h_3 = \frac{f_{3a}}{\pi D_{3cp}}; \quad \theta_{c3} = \frac{D_{3cp}}{h_3}.$$

8. Рассчитываются геометрические размеры ступеней турбины:

$$h_{ci} = h_3 + \frac{h_4 - h_3}{\mathcal{Z}} (i-1); \quad D_{cpi} = D_{3cp} + \frac{D_{4cp} - D_{3cp}}{\mathcal{Z}} (i-1);$$

$$\theta_{ci} = \frac{D_{cpi}}{h_{ci}}; \quad \left(\frac{h}{S_{cp}} \right)_{ci} = 6,14 - (0,74 - 0,0297 \theta_{ci}) \theta_{ci};$$

$$S_{cpi} = h_{ci} : \left(\frac{h}{S_{cp}} \right)_{ci}; \quad h_{pi} = \frac{h_{ci} + h_{c(i+1)}}{2};$$

$$D_{cspi} = \frac{D_{cpi} + D_{cpi(i+1)}}{2}; \quad \theta_{pi} = \frac{D_{cspi}}{h_{pi}};$$

$$\left(\frac{h}{S_{cp}} \right)_{pi} = 6,85 - (0,76 - 0,0297 \theta_{pi}) \theta_{pi}; \quad S_{cspi} = h_{pi} : \left(\frac{h}{S_{cp}} \right)_{pi};$$

$$\delta'_{oci} = \bar{\delta}_{oc} \frac{h_{ci} + h_{pi}}{2}; \quad \delta''_{oci} = \bar{\delta}_{oc} \frac{h_{pi} + h_{c(i+1)}}{2}.$$

Вычисления по формулам этого пункта повторяются с $i = I$ до $i = \mathcal{Z}$.

13. ПРОГРАММА № 2Т. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА В СЕЧЕНИЯХ МЕЖДУ СТУПЕНЯМИ

Исходные параметры (данные)

- p_3^* (кПа), T_3^* (К) – параметры газа на входе;
 $G_{ГЗ}$ – расход газа на вход, кг/с;
 $\bar{q}_i = \frac{G_{ГЗ}}{G_{ГЗ}}$ ($i=1,2,\dots,(z-1)$) – относительные расходы газа на входе в ступени;
 $\frac{1}{\alpha}$ – величина, обратная коэффициенту избытка воздуха;
 $\eta_{СТС}^*$ – средний изэнтропический КПД ступени;
 $U_{1ср}$ – окружная скорость на среднем радиусе первого колеса ($U_{1ср} \equiv U_{3ср}$ в программе № 1Т), м/с;
 $L_{Т\Sigma}^*$ ($z-1$) – суммарная работа $z-1$ -ой ступени, Дж/кг;
 z – число ступеней;
 $\delta_{РК}$ – среднее значение коэффициента вторичных потерь;
 γ – среднее значение коэффициента скорости сопловых аппаратов;
 $D_{1ср}, D_{2ср}, \dots, D_{(z-1)ср}$ – средние диаметры на входе в рабочие колеса ступеней, м;
 $h_{1с}, h_{2с}, \dots, h_{(z-1)с}$ – высоты сопловых лопаток ступеней, м.

Методика и алгоритм расчета

Вычисляются средние действительная и изэнтропическая работы ступени:

$$L_{Тсрi}^* = \frac{L_{Т\Sigma}^*(z-1)}{z-1}, \quad L_{Т.срi}^* = \frac{L_{Т.срi}^*}{\eta_{СТС}^*}$$

Обращаются к подпрограммам № 1 ТД, № 2 ТД для определения энтальпии i_3^* и η -функции η_3^* по заданной температуре T_3^* и величине $1/\alpha$.

Вычисляются действительная и изэнтропическая энтальпии за ступенями:

$$i_{0(i+1)}^* = i_{0i}^* - L_{Т.срi}^* \frac{1}{4189}; \quad i_{0s(i+1)}^* = i_{0i}^* - L_{Т.срi}^* \frac{1}{4189},$$

где $i_{01}^* \equiv i_3^*$.

Обращаются к подпрограмме № 3 ТД для определения температуры $T_{0s(i+1)}^*$, а затем к подпрограмме № 2 ТД для определения $\eta_{0s(i+1)}^*$ и вновь к подпрограмме № 3 ТД для определения температур $T_{0(i+1)}^*$.

Далее вычисляются $p_{0(i+1)}^* = p_{0i}^* \frac{\pi_{0s(i+1)}^*}{\pi_{0i}^*}$ (где $p_{0i}^* \equiv p_3^*$; $\pi_{0i}^* \equiv \pi_3^*$).

Вычисляются коэффициенты нагрузки ступеней:

$$C_{0i}^* = \sqrt{2 \Delta L_{TSMi}^*}; \quad U_{icp} = U_{icp} \frac{D_{icp}}{D_{icp}}; \quad y_i^* = \frac{U_{icp}}{C_{0i}^*}$$

Если получается $y_i^* \geq 0,5$, то принимается угол $\alpha_{0(i+1)} = 75^\circ$.

Если получается $y_i^* < 0,5$, то принимается угол $\alpha_{0(i+1)} = 70^\circ$.

Вычисляются площади, числа λ и скорости на входе в ступени:

$$f_{(i+1)a} = \pi D_{(i+1)c} h_{(i+1)c}; \quad q_{i+1} = q(\lambda_{0(i+1)}) = \frac{2,525 \cdot 10^6 G_{i+1} \sqrt{T_{0(i+1)}^*}}{p_{0(i+1)}^* f_{(i+1)a} \sin \alpha_{0(i+1)}}$$

Обращаются к подпрограмме № 3 ГД, задавая $K = I, 33$, для определения числа $\lambda_{0(i+1)}$:

$$A_{kpo(i+1)} = 18,1 \sqrt{T_{0(i+1)}^*}; \quad C_{0(i+1)} = \lambda_{0(i+1)} A_{kpo(i+1)};$$

$$C_{0(i+1)a} = C_{0(i+1)} \sin \alpha_{0(i+1)}; \quad \bar{C}_{2ia} = \frac{C_{0(i+1)a}}{U_{icp}}$$

Вычисляются коэффициенты напора и степени реактивности:

$$\bar{H}_{Tui} = 0,5 \frac{2 c_{ts}^*}{y_i^{*2} \delta_{ок}}; \quad \rho_{cpi} = 1 + \bar{C}_{2ia} \operatorname{ctg} \alpha_{0(i+1)} - \frac{\bar{H}_{Tui}}{2}$$

Обращаются к подпрограмме № 2 ГД, задавая $K_T = I, 33$, для определения функции $\pi(\lambda_{0(i+1)})$. Вычисляются статические давления на входе в ступени и величины π -функций:

$$p_{0(i+1)} = p_{0(i+1)}^* \pi(\lambda_{0(i+1)}); \quad \pi_{2si} = \pi_{0i}^* \frac{p_{0(i+1)}}{p_{0i}^*};$$

(где $p_{0(i+1)} \equiv p_{2i}$).

Обращаются к подпрограммам № 4 ТД и № I ТД для определения i_{2si} . Рассчитываются располагаемые теплоперепады на ступенях, сопловых аппаратах и соответствующие скорости:

$$\Delta i_{si} = i_{0i}^* - i_{2si}; \quad \Delta i_{csi} = (1 - \rho_{cpi}) H_{si};$$

$$C_{1si} = \sqrt{2 \Delta i_{csi}}; \quad \alpha_{kpi} = 18,1 \sqrt{T_{0i}^*}; \quad \lambda_{cisi} = \frac{C_{1si}}{\alpha_{kpi}};$$

$$\lambda_{cii} = \psi \lambda_{cisi}$$

Обращаются к подпрограмме # 2 ГД, задавая $K_T=I,33$, для определения функций $\Pi(\lambda_{c1s1})$ и $\Pi(\lambda_{c1i})$.

Обращаются к подпрограмме # I ГД для определения функции $q(\lambda_{c1i})$.
Вычисляются угол потока на выходе из соплового аппарата, степень реактивности в корневом сечении:

$$\alpha_{ii} = \alpha_{2c} \sin \left[\frac{2,477 G_{r3} \bar{q}_i \sqrt{T_{0i}}}{P_{0i}^* \varphi_{ia} q(\lambda_{c1i})} \frac{\Pi(\lambda_{c1i})}{\Pi(\lambda_{c1s1})} \right]; \quad \theta_{ii} = \frac{D_{cpi}}{h_{ci}}$$

$$q_{ki} = 1 - (1 - q_{cpi}) \left(\frac{\theta_{ii}}{\theta_{ii-1}} \right).$$

Расчет по этой подпрограмме выполняется для всех Z - I-й ступеней.

14. ПРОГРАММА # 3 Т. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ В МЕЖВЕНЦОВЫХ ЗАЗОРАХ СТУПЕНИ ТУРБИНЫ

Исходные параметры (данные)

- P_{0,T_0}^* - параметры на входе;
- G_{r1} - расход газа на входе, кг/с;
- P_2 - статическое давление за рабочим колесом;
- α_0, α_1 - углы на входе и на выходе из соплового аппарата;
- λ_{c1s} - изоэнтропическая скорость на выходе из соплового аппарата;
- ψ - предварительное значение коэффициента скорости соплового аппарата;
- Ψ - предварительное значение коэффициента скорости рабочего колеса;
- G_{r2} - расход газа на выходе из рабочего колеса (без учета утечек через радиальный зазор в колесе) кг/с;
- $\frac{1}{\alpha}$ - величина, обратная коэффициенту избытка воздуха;
- U_{1cp} - окружная скорость на среднем радиусе, м/с;
- D_{1cp} - средний диаметр, м;
- h_{0c} - высота сопловой лопатки на входе, м;
- h_{1pk} - высота рабочей лопатки на входе, м;
- S_{ca}, S_{pk} - ширина лопатки с.а. и лопатки р.к., м;
- $D_{1п}, D_{2п}$ - периферийные диаметры на входе и выходе из колеса, м;
- d_i - толщина выходных кромок на выходе из с.а., м;

δ_p - радиальный зазор в р.к., м;

ω_1 - признак конструктивной формы лопаточного венца РК, если РК с бандажем, то

$\omega_1 = 1$ и тогда задается число гребешков

лабиринта (Z_λ), если РК без бандажа, то

$\omega_1 = 0$.

h_{2PK}, d_{2CP}, d_2 - высота рабочей лопатки, средний диаметр и толщина кромки на выходе, м.

Методика и алгоритм расчета

I. Определяется минимальный коэффициент потерь на трение, для чего вычисляются сумма углов, отношение синусов:

$$\sum \alpha = \alpha_0 + \alpha_1, \text{ град}; \quad K_c = \frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha_1};$$

и затем вычисляется величина $\xi_{\text{тр min}}$ по интерполяционным зависимостям, полученным по графику из пособия [I, рис. II, стр. 29].

При $K_{c1} = 1, 1$

$$y = 0,1803 - 263 \cdot 10^{-5} x + 1,1 \cdot 10^{-5} x^2, \quad \text{где } x = \sum \alpha.$$

При $K_{c2} = 1, 3$

$$y = 0,0416 - 47 \cdot 10^{-5} x + 0,2 \cdot 10^{-5} x^2, \quad y = \xi_{\text{тр min}}.$$

При $K_{c3} \geq 1, 5$

$$y = 0,0323 - 41,1 \cdot 10^{-5} x + 0,188 \cdot 10^{-5} x^2.$$

Вычисляются коэффициент трения

$$\xi_{\text{тр}} = 1,8 \xi_{\text{тр min}};$$

угол установки профиля в сопловой решетке

$$\alpha_y = 76 - 67 \cdot 10^{-2} (\alpha_0 - \alpha_1) + 22 \cdot 10^{-4} (\alpha_0 - \alpha_1)^2.$$

(Эта интерполяционная зависимость получена по графику из пособия [I, рис. I2, стр. 3I], хорда профиля

оптимальный шаг решетки [4, стр. I84, 236] $\delta_{CA} = \frac{S_{CA}}{\sin \alpha_y}$,

$$\left(\frac{t}{\delta_{CA}} \right)_{\text{онм}} = 0,55 \left[\frac{180}{180 - (\alpha_0 + \alpha_1)} \frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha_1} \right]^{\frac{1}{3}}; \quad t'_{\text{онм}} = \delta_{CA} \left(\frac{t}{\delta_{CA}} \right)_{\text{онм}};$$

$$Z'_{\text{онм}} = \frac{\pi d_{1CP}}{t'_{\text{онм}}}.$$

Округляется число Z'_{0nm} до ближайшего целого числа лопаток Z_{0nm} и уточняется шаг

$$t_{0nm} = \frac{\pi D_{ср}}{Z_{0nm}}$$

Вычисляется граничная скорость $\lambda_{сис}^{пред}$, при которой в горле межлопаточного канала наступает критический режим, и эффективный угол потока на выходе из решетки $\alpha_{13ф}$

$$\lambda_{сис}^{пред} = 0,96 - 0,405 \cdot 10^{-2} (\alpha_1 - 15)^{0,89}$$

Если получено $\lambda_{сис}^{пред} > \lambda_{сис}$, то определяется поправка на угол

$$\Delta \alpha_1 = (8,54 + 2,42 \lambda_{сис}) \left(\frac{\alpha_1}{40} \right)^{1,48} \sin \alpha_1 \cos \left(\frac{\pi}{2} \lambda_{сис} \right)$$

(Эта интерполяционная зависимость получена по графику из пособия I, рис. I4, стр. 33). Определяется

$$\text{угол } \alpha_{13ф} \quad \alpha_{13ф} = \alpha_1 - \Delta \alpha_1$$

Если же получено неравенство $\lambda_{сис} > \lambda_{сис}^{пред}$, то вычисляется число λ в горле

$$\lambda_n = \sqrt{1 - \xi_{тр}}$$

Обращаются к подпрограмме № I ГД для вычисления величин $q(\lambda_n)$ и $q(\lambda_{сис})$ при $Kr=I,33$, а затем к подпрограмме № 2 ГД для вычисления величин $\pi(\lambda_{сис})$, $\pi(\lambda_{сис})$, $\pi(1)$, $\pi(\lambda_n)$.

2. Вычисляются коэффициенты потерь и угол $\alpha_{13ф}$:

$$G_1 = \frac{\pi(\lambda_{сис})}{\pi(\lambda_{сис})}; \quad G_n = \frac{\pi(1)}{\pi(\lambda_n)}$$

$$\alpha_{13ф} = \arcsin \left[\frac{q(\lambda_{сис})}{q(\lambda_n)} \frac{G_1}{G_n} \sin \alpha_1 \right]$$

Определяется ширина межлопаточного канала в горле, коэффициент кроночных потерь, минимальный и уточненный коэффициенты профильных потерь:

$$a_{t_{0nm}} = t_{0nm} \sin \alpha_{13ф}; \quad \xi_{кр} = 0,2 \frac{d_1}{a_{t_{0nm}}}; \quad \xi_{пр. мин} = \xi_{тр} + \xi_{кр};$$

$$\bar{\xi}_\lambda = 1 + 2 \lambda_{сис} |\lambda_{сис} - 0,8|; \quad \xi_{пр}^p = \xi_{пр} \bar{\xi}_\lambda$$

Определяется число Re в сопловом венце

$$Re = \frac{G_1 v_{ср}}{f_{1a} 9,81 \mu_c}$$

где коэффициент динамической вязкости

$$\mu_c = \left(1,72 + 2,5 \frac{T_0}{10^3} \right) 10^{-6}$$

и площадь $f_{1a} = \pi D_{1cp} h_{1рк}$.

Определяются коэффициент профильных потерь с учетом влияния числа Re , коэффициент концевых потерь и коэффициент суммарных потерь:

$$\xi_{пр Re}^p = \xi_{пр}^p + \frac{2100}{Re_{ска}}; \quad h_{ссп} = \frac{h_{оса} + h_{1рк}}{2}; \quad \xi_k = 2 \xi_{тр} \frac{G_{тонм}}{h_{ссп}};$$

$$\xi_1 = \xi_{пр Re}^p + \xi_k.$$

3. Вычисляется коэффициент суммарных потерь с учетом шероховатости

$$\xi_{\theta} = 1 + 29 \left(\frac{h_{1рк}}{D_{1cp}} \right)^3; \quad \xi_1^p = \xi_1 \xi_{\theta}.$$

4. Определяется коэффициент скорости, действительная скорость истечения газа и энтальпия на выходе из соплового аппарата:

$$\psi = 1 - \xi_1^p; \quad C_1 = \psi \cdot 18,1 \sqrt{T_u^*} \lambda_{сис}; \quad i_1 = i_0^* - \frac{C_1^2}{2};$$

$$i_{1s} = i_0^* - \frac{C_1^2}{2\psi^2}.$$

Обращаются к подпрограмме № 2 ТД для определения величин π_{10}^* , π_{1s} .
Вычисляется статическое давление за сопловым аппаратом

$$p_1 = p_0^* \frac{\pi_{1s}}{\pi_{10}^*}.$$

Обращаются к подпрограмме № 3 ТД для определения T_1 .

Вычисляются массовая плотность и угол на выходе из аппарата

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1}; \quad \alpha_1 = \arcsin \frac{G_{r1}}{C_1 \rho_1 f_{1a}}.$$

Вычисляется относительная разность синусов полученного и заданного угла α_1 :

$$\Delta = \frac{|\sin \alpha_1 - \sin \alpha_{1зад}|}{\sin \alpha_1}.$$

Если получено $\Delta \leq 0,05$, то расчет продолжается.

Если же $\Delta > 0,05$, то повторяют расчет с полученным углом α_1 , начиная с вычисления минимального коэффициента трения

$$\xi_{тр, мин}(n, l).$$

5. Рассчитываются кинематические и газодинамические параметры на входе в колесо:

$$C_{1a} = C_1 \sin \alpha_1; \quad C_{1u} = C_1 \cos \alpha_1; \quad w_{1u} = C_{1u} - U_1;$$

$$\beta_1 = \arcsin \frac{C_{1a}}{w_{1u}} \quad \text{при } w_{1u} > 0; \quad \beta_1 = 180^\circ - \arcsin \frac{C_{1a}}{|w_{1u}|} \quad \text{при } w_{1u} < 0;$$

$$w_{1r} = \sqrt{C_{1a}^2 + w_{1u}^2}; \quad \Delta i_{w_1} = \frac{w_{1r}^2}{2}; \quad i_{w_1}^* = i_1 + \Delta i_{w_1}.$$

Обращаются к подпрограмме № 3 ТД для определения температуры $T_{w_1}^*$, и к подпрограмме № 2 ТД для определения величин $\pi_{w_1}^*$ и π_1 .

Вычисляются критическая скорость звука, число λ и полное давление в относительном движении на входе в рабочее колесо:

$$\alpha_{кр \omega_1} = 18,1 \sqrt{T_{\omega_1}^*}; \quad \lambda_{\omega_1} = \bar{\lambda}_1 = \frac{\omega_1}{\alpha_{кр \omega_1}}; \quad P_{\omega_1}^* = P_1 \frac{\pi_{\omega_1}^*}{\pi_1}$$

6. Рассчитываются газодинамические и кинематические параметры за рабочим колесом

$$\pi_{2S} = \pi_{\omega_1}^* \frac{P_2}{P_{\omega_1}^*}$$

Обращаются к подпрограмме № 4 ТД для определения температуры T_{2S} и подпрограмме № 1 ТД для определения энтальпии i_{2S} и далее вычисляются кинематические параметры на выходе из колеса:

$$\Delta i_{\omega_2} = i_{\omega_1}^* - i_{2S}; \quad \omega_{2S} = \sqrt{2 \Delta i_{\omega_2}};$$

$$\lambda_{\omega_{2S}} = \frac{\omega_{2S}}{\alpha_{кр \omega_1}}; \quad \lambda_{\omega_2} = \psi \lambda_{\omega_{2S}}$$

Обращаются к подпрограмме № 2 ГД для определения величин $\pi(\lambda_{\omega_{2S}})$ и $\pi(\lambda_{\omega_2})$ и затем к подпрограмме № 1 ГД для определения величины $q(\lambda_{\omega_2})$.

Вычисляются площадь и угол потока в относительном движении на выходе:

$$f_{2a} = \pi D_{2cp} h_{2pk}; \quad \beta_2' = \arcsin \left[\frac{2,477 G_{r2} \sqrt{T_{\omega_1}^*}}{P_{\omega_1}^* f_{2a} q(\lambda_{\omega_2})} \frac{\pi(\lambda_{\omega_{2S}})}{\pi(\lambda_{\omega_2})} \right]$$

7. Повторяется расчет по п.п. 1.2. для рабочего колеса при замене параметров, указанных по табл. I.

Т а б л и ц а I

параметр в сопловом аппарате									
α_0	α_1	S_{CA}	D_{1cp}	C_{1S}	d_1	C_1	h_{0CA}	h_{1pk}	T_0^*
соответствующий параметр в рабочем колесе									
β_1	β_2	S_{pk}	D_{2cp}	ω_{2S}	d_2	C_2	h_{1pk}	h_{2pk}	$T_{\omega_1}^*$

В результате расчета определяются параметры, указанные в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

$\xi_{тр. min}$	$\xi_{тр}$	β_y	δ_{pk}	$t_{0nп. pk}$	ξ_{pk}	$\beta_{23\phi}$	$\alpha_{t0nп.}$
$\xi_{кр}$	$\xi_{np. min}$	ξ_{λ}	f_{2a}	R_{epk}	$\xi_{np. re}$	ξ_k	ξ_2

8. Определяются коэффициент скорости колеса, скорость и энтальпия на выходе из колеса:

$$\psi = \sqrt{1 - \xi_2}; \quad \omega_2 = \psi \omega_{2s}; \quad \Delta i_{\omega 2} = \frac{\omega_2^2}{2};$$

$$i_2 = i_{\omega 1}^* - \Delta i_{\omega 2}.$$

Обращаются к подпрограмме № 3 ТД для определения температуры T_2 и затем вычисляется плотность

$$\rho_2 = \frac{P_2}{RT_2}.$$

9. Рассчитываются утечки газа через радиальный зазор в рабочем колесе. Для этого вычисляются периферийный диаметр, площадь зазора, изэнтропическое число на периферии:

$$D_n = \frac{D_{1n} + D_{2n}}{2} + 0,005; \quad f_{зпз} = \pi D_n \delta_p;$$

$$\lambda_{cisn} = \lambda_{cis.sp} \left(\frac{D_{icp}}{D_{np}} \right)^{\gamma^2 \cos^2 \alpha_1}.$$

Обращаются к подпрограмме № 2 ГД для определения величины $\pi(\lambda_{cisn})$ и затем вычисляется статическое давление на периферии перед колесом

$$P_{in} = P_0^* \pi(\lambda_{cisn}).$$

Рассчитываются относительные величины зазора и соответствующие коэффициенты для вычисления утечки газа:

$$\tilde{\delta}_p = \frac{\delta_p}{t_{\text{гип.рк}}}; \quad \bar{\delta}_p = \frac{\delta_p}{S_{\text{рк}}};$$

$$K_T = 0,535 + 1,493 \tilde{\delta}_p - 0,361 \tilde{\delta}_p^2.$$

(интерполяционная зависимость, полученная по графику из пособия [1, рис. 20^б, стр. 45]). При $\bar{\delta}_p \geq 3,5$ принимается $K_2 = 1$.

Если же $\bar{\delta}_p < 3,5$, то $K_2 = 1,184 - 0,104 \bar{\delta}_p + 0,01397 \bar{\delta}_p^2$

(интерполяционная зависимость, полученная по графику из пособия [1, рис. 20^б, стр. 45]). Если колесо проектируется без бандажа, т.е. $\omega_1 = 0$, то расчет продолжается с п. 9.1.

Если колесо проектируется с бандажем, т.е. $\omega_1 = 1$, то переходят к исполнению п. 9.2.

9.1. Вычисляется число λ в зазоре

$$\pi(\lambda_{зпз}) = \frac{P_2}{P_{in}}.$$

Обращаются к подпрограмме № 4 ГД для определения величины $\lambda_{3аз}$, а затем к подпрограмме № I ГД для определения величины $q(\lambda_{3аз})$.

Вычисляется утечка газа через зазор

$$G_{3аз} = \frac{2,477 K_1 K_2 f_{3аз} q(\lambda_{3аз}) P_{1п}}{\sqrt{T_0^*}}$$

и далее переходят к выполнению п.9.3.

9.2. Рассчитывается утечка газа через зазор $G_{3аз} = K_1 K_2 f_{3аз} \frac{P_{1п}}{\sqrt{RT_0^*}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^2}$.

9.3. Вычисляется расход газа и угол потока на выходе из колеса

$$G_{r2} = G_{r2}^i - G_{3аз}; \quad \beta_2 = \arcsin \frac{W_2 P_2 f_{2д}}{G_{r2}}$$

Рассчитывается относительная разность амбуов углов

$$\Delta = \frac{|\sin \beta_2 - \sin \beta_2^i|}{\sin \beta_2}$$

Если получено $\Delta > 0,03$, то расчет повторяется с п. 7, задавая угол β_2 вместо угла β_2^i .

Если получено $\Delta \leq 0,03$, то расчет продолжается.

10. Определяются кинематические параметры за рабочим колесом:

$$W_{2а} = W_2 \sin \beta_2; \quad W_{2u} = W_2 \cos \beta_2; \quad C_{2u} = W_{2u} - u;$$

$$C_2 = \sqrt{C_{2u}^2 + W_{2а}^2}; \quad \Delta i_{c2} = \frac{C_2^2}{2}; \quad i_2^* = i_2 + \Delta i_{c2};$$

$$\alpha_2 = \arcsin \frac{W_{2а}}{C_2}, \quad \text{если } C_{2u} > 0;$$

$$\alpha_2 = 180^\circ - \arcsin \frac{W_{2а}}{C_2}, \quad \text{если } C_{2u} < 0.$$

Обращаются к подпрограмме № I ТД для определения энтальпии i_0^* и затем вычисляется работа ступени

$$L_{л.рк}^* = i_0^* - i_2^*.$$

Определяется величина потерь работы в радиальном зазоре.

Если рабочие лопатки без бандажа ($\omega_1 = 0$), то

$$\Delta L_{3аз}^* = \frac{G_{3аз}}{G_{r1}} L_{л.рк}^*.$$

Если на рабочие лопатки с бандажем ($\omega_1 = 1$), то для радиально установленных сопловых лопаток вычисляются

$$\bar{\alpha}_{3аз} = 1,37 (1 + 1,6 \rho_{ср}) \frac{\theta_1 + 1}{\theta_1}; \quad \text{где } \theta_1 = \frac{D_{1ср}}{h_{1рк}}$$

$$\text{и } \Delta L_{3аз}^* = \bar{\alpha}_{3аз} \frac{2\delta_p}{h_{1рк} + h_{2рк}} L_{л.рк}^*.$$

15. ПРОГРАММА № 4 Т. РАСЧЕТ ТЕПЛОПЕРЕПАДА, КПД СТУПЕНИ И ПОЛНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗА НЕЙ

Исходные параметры (данные)

- $G_{r1}, \rho_0^*, i_0^*, \pi_0^*$ - расход газа (кг/с), полное давление (МПа), полная энтальпия (Дж/кг). Π - функция на входе;
- ρ_2^* (кПа), i_2, i_{2s} Дж/кг - параметры потока на выходе;
- C_2 м/с
 $L_{ст.з}^*$ - заданная эффективная работа ступени, Дж/кг;
- $i_{в.охл}^*$ - полная энтальпия охлаждающего воздуха, Дж/кг;
- $G_{в.охл}$ - расход охлаждающего воздуха, поступающего в газ за колесом, кг/с;
- Δi_{cs} - изоэнтропический теплоперепад в сопловом аппарате, Дж/кг;
- $\eta_{ст.с'}$ - приближенное значение КПД ступени;
- n - частота вращения колеса, об/мин;
- C_{2u} - закрутка потока на выходе, м/с;
- $D_d = \frac{D_{1k} + D_{2k}}{2}$ - средний периферийный диаметр диска, м;
- $\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$ - средняя массовая плотность газа около диска кг/м³;
- ω_2 - признак расположения ступени: первой и промежуточной ступени соответствует $\omega_2 = 0$, последней ступени $\omega_2 = 1$.

Методика и алгоритм расчета

Рассчитываются потери на трение диска о газ, суммарные потери работ и соответствующие энтальпии за колесом:

$$\Delta L_{тр} = \frac{1,703}{G_{r1}} D_d^2 \left(\frac{\Pi D_d n}{60 \cdot 100} \right)^3 \rho \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \Delta L_{пот} = \Delta L_{звз} + \Delta L_{тр};$$

$$i_2' = i_2 + \Delta L_{пот}; \quad i_2^* = i_2' + \frac{C_2^2}{2}.$$

Обращаются к подпрограмме № 3 ТД для определения температур

T_2' и T_2^* , а затем к подпрограммам № 2 ТД для определения величин

$$\pi_2' \text{ и } \pi_2^*.$$

Вычисляется эффективная работа ступени

$$L_{см}^* = i_0^* - i_2^*.$$

и относительная разность между ней и заданной работой

$$\delta \bar{L}_{ст}^* = \frac{|L_{см}^* - L_{ст.з}^*|}{L_{см}^*}.$$

Если получается

$$\delta \bar{L}_{ст}^* > 0,015, \text{ то уточняется давление } \rho_2$$

следующим образом. Рассчитывается измененное значение изэнтропической энтальпии на выходе

$$i_{2S}^{(m)} = i_{2S}^{(m-1)} - \frac{L_{ст.3}^* - L_{ст}^*}{\eta_{ст.3}^*}$$

по ее величине; обращаясь к подпрограммам № 3 ТД и № 2 ТД, определяются величины $T_{2S}^{(m)}$ и $\pi_{2S}^{(m)}$. Используя эти величины, вычисляется уточненное значение

$$p_2^{(m)} = p_0^* \frac{\pi_{2S}^{(m)}}{\pi_0^*},$$

с которым продолжается расчет. Вычисляются степень реактивности, полное давление, число λ на выходе из колеса:

$$p_{ср} = 1 - \frac{\Delta L_{ст}}{i_0^* - i_{2S}^{(m)}}; \quad p_2^* = p_2^{(m)} \frac{\pi_2^*}{\pi_2^{(m)}}; \quad \lambda_{кр2} = 18,1 \sqrt{T_2^*}.$$

Рассчитываются снижение полной энтальпии газа из-за подмешивания охлаждающего воздуха, энтальпия и температура такого газа:

$$\Delta i_{охл}^* = \frac{\Delta G_{охл}}{G_{ст} + \Delta G_{охл}} (i_0^* - i_{охл}^*); \quad i_{2'охл}^* = i_2^* - \Delta i_{охл}^*.$$

Обращаются к подпрограмме № 3 ТД для определения температуры $T_{2'охл}^*$. Если ступень первая или промежуточная ($\omega_2 = 0$) вычисляется для выхода

$$\pi_{2S}^* = \pi_0^* \frac{p_2^*}{p_0^*},$$

обращаются к подпрограмме № 4 ТД для определения температур T_{2S}^* , а затем к подпрограмме № 1 ТД для определения энтальпии i_{2S}^* .

Вычисляются изэнтропическая работа и КПД

$$L_{ст.S}^* = i_0^* - i_{2S}^*; \quad \eta_{ст.S}^* = \frac{L_{ст}^*}{L_{ст.S}^*},$$

и на этом расчет по данной программе заканчивается.

Если же ступень последняя, т.е. $\omega_2 = 1$, то вычисляется энтальпия, учитывающая закрутку потока на выходе

$$i_{2'}^* = i_{2S}^* + \frac{S_{2H}^*}{2}.$$

Обращаются к подпрограммам № 4 ТД для определения температуры $T_{2'}^*$ и к подпрограмме № 1 ТД для определения функции $\pi_{2'}^*$.

Вычисляются полное давление p_2^* и функция $\pi_{2'S}^*$:

$$p_2^* = p_2 \frac{\pi_{2'}^*}{\pi_{2S}^*}; \quad \pi_{2'S}^* = \pi_0^* \frac{p_2^*}{p_0^*}.$$

Обращаются к подпрограмме № 4 ТД для определения температуры и к подпрограмме № 1 ТД для определения энтальпии $i_{2'S}^*$.

Вычисляются изэнтропическая работа и КПД:

$$L_{ст.S}^* = i_0^* - i_{2'S}^*; \quad \eta_{ст.S}^* = \frac{L_{ст}^*}{L_{ст.S}^*}.$$

16. ПРОГРАММА № 5Т. РАСЧЕТ КПД КАСКАДОВ ТУРБИНЫ И
СУММАРНОГО КПД ПРОЦЕССА РАСШИРЕНИЯ

Исходные параметры (данные)

p_0^* , кПа, T_0^* , К – полное давление и температура на входе в каскад ВД;

$p_{2ВД}^*$ – полное давление на выходе из каскада ВД, кПа;

$L_{ТВД}$ – работа каскада ВД, Дж/кг.

Если имеется каскад НД, то для него задаются

$p_{2НД}^*$ – полное давление на выходе, кПа.

Различные схемы отличаются признаком

$\omega_3 = 0$ – турбина имеет один каскад;

$\omega_3 = 1$ – турбина состоит из каскадов ВД и НД.

Если турбина имеет три каскада ВД, СД, НД, то она рассчитывается дважды по признаку $\omega_3 = 1$: вначале как ВД+СД, а затем как (ВД+СД)+НД.

Методика и алгоритм расчета

Обращаются к подпрограмме № 1 ТД для определения энтальпии i_0^* и к подпрограмме № 2 ТД для определения величины Π_0^* .

Вычисляется изоэнтропическая Π -функция за турбиной ВД

$$\Pi_{2S}^* = \Pi_0^* \frac{p_{2ВД}^*}{p_0^*}.$$

Обращаются к подпрограмме № 4 ТД для определения температуры T_{2S}^* и к подпрограмме № 1 ТД для определения энтальпии i_{2S}^* .

Вычисляются изоэнтропическая работа и КПД турбины ВД

$$L_{ТВД}^* = i_0^* - i_{2S}^*; \quad \eta_{ТВД}^* = \frac{L_{ТВД}^*}{L_{ТВД}^{*0}}.$$

Если задано значение признака $\omega_3 = 0$, то на этом расчет

заканчивается. При значении признака $\omega_3 = 1$ вычисляются

суммарная работа турбины, Π -функция на выходе из турбины НД

$$L_{ТЭ}^* = L_{ТВД}^* + L_{ТНД}^*; \quad \Pi_{2S}^* = \Pi_0^* \frac{p_{2НД}^*}{p_0^*}.$$

Обращаются к подпрограмме № 4 ТД для определения температуры и к подпрограмме № I ТД для определения энтальпии.

Вычисляются изобэнтропическая работа и КПД

$$L_{T\Sigma}^* = i_0^* - i_{2\Sigma}^*; \quad L_{T\Sigma}^* = L_{T\Sigma S}^* / \eta_{T\Sigma S}^* .$$

17. ПРОГРАММА № 6 Т. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА НА РАЗЛИЧНЫХ РАДИУСАХ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБИНЫ

Исходные параметры (данные)

P_0^* , кПа, T_0^* , К - полное давление и температура на входе;

$C_{1ср}$, м/с, $\alpha_{1ср}$, град, $U_{1ср}$, м/с, ψ - скорость, угол потока, окружная скорость на входе на среднем радиусе, коэффициент скорости соплового аппарата;

$C_{2ср}$, м/с, P_2 , кПа, $\alpha_{2ср}$, град., $\rho_{2ср}$, кг/м³ - закрутка, давление, угол потока, плотность на выходе из колеса на среднем радиусе, коэффициент скорости колеса;

ω_4 - признак распределения нагрузки по радиусу колеса; значение $\omega_4 = 0$ соответствует закону постоянства удельной работы, значение $\omega_4 = 1$ соответствует закону постоянства направления абсолютной скорости ($\alpha_2 = \text{Const}$);

$L_{T\Sigma} = C_{1ср} U_{1ср} + C_{2ср} U_{2ср}$ - удельная работа на среднем радиусе, Дж/кг;

$D_{1пер}$, $D_{1к}$ - периферийный и втулочный диаметры на входе в колесо, м;

$D_{2пер}$, $D_{2к}$ - периферийный и втулочный диаметры на выходе из колеса, м.

Методика и алгоритм расчета

Расчет выполняется для 5 значений соответствующих диаметров на входе и выходе из колеса:

$$D_{11} = D_{1к}; \quad D_{12} = \frac{D_{1к} + D_{1ср}}{2}; \quad D_{13} = D_{1ср} = \sqrt{\frac{D_{1пер}^2 + D_{1к}^2}{2}}; \quad D_{14} = \frac{D_{1ср} + D_{1пер}}{2}; \quad D_{15} = D_{1пер}$$

$$D_{21} = D_{2к}; \quad D_{22} = \frac{D_{2к} + D_{2ср}}{2}; \quad D_{23} = D_{2ср} = \sqrt{\frac{D_{2пер}^2 + D_{2к}^2}{2}}; \quad D_{24} = \frac{D_{2ср} + D_{2пер}}{2}; \quad D_{25} = D_{2пер}$$

Расчет параметров потока перед рабочим колесом

Рассматривается закон $\alpha_1 = \text{Const}$ при радиальной установке лопаток. Рассчитываются скорости на выходе из соплового аппарата:

$$\bar{D}_1 = \frac{D_1}{D_{1\text{ср}}}; \quad \tilde{D}_1 = \bar{D}_1^{y^2 \cos^2 \alpha_{1\text{ср}}}; \quad C_1 = \frac{C_{1\text{ср}}}{\tilde{D}_1}; \quad C_{1a} = C_1 \sin \alpha_{1\text{ср}};$$

$$C_{1u} = C_1 \cos \alpha_{1\text{ср}}; \quad C_{1s} = C_1 / \psi; \quad \alpha_{\text{кpo}} = 18,1 \sqrt{T_0^*}; \quad \lambda_{\text{с1s}} = C_{1s} / \alpha_{\text{кpo}};$$

$$\Delta i_{\text{с1s}} = \frac{1}{2} C_{1s}^2; \quad \Delta i_{\text{с1}} = \frac{1}{2} C_1^2.$$

Обращение к подпрограммам № 1 ТД для определения энтальпии i_0^* и к подпрограмме № 2 ТД для определения величины Π_0^* .

Вычисляются энтальпии $i_{1s} = i_0^* - \Delta i_{\text{с1s}}; i_1 = i_0^* - \Delta i_{\text{с1}}.$

Обращение к подпрограмме № 3 ТД для определения температур T_{1s} и T_1 и к подпрограмме № 2 ТЛ для определения величины Π_{1s} и Π_1 .

Вычисляются давление, плотность и относительные скорости:

$$P_1 = P_0^* \frac{\Pi_{1s}}{\Pi_0^*}; \quad \rho_1 = \frac{P_1}{RT_1}; \quad U_1 = U_{1\text{ср}} \bar{D}_1; \quad W_{1u} = C_{1u} - U;$$

$$W_1 = \sqrt{W_{1u}^2 + C_{1a}^2}; \quad \Delta i_{W_1} = \frac{1}{2} W_1^2; \quad i_{W_1}^* = i_1 + \Delta i_{W_1};$$

$$\beta_1 = \arctg \frac{C_{1a}}{W_{1u}} \text{ если } W_{1u} > 0; \quad \beta_1 = 180^\circ - \arctg \frac{C_{1a}}{|W_{1u}|} \text{ если } W_{1u} < 0.$$

Обращаются к подпрограмме № 3 ТД для определения температуры $T_{W_1}^*$ и к подпрограмме № 2 ТД для определения величины $\Pi_{W_1}^*$.

Рассчитываются давление и число λ в относительном движении

$$P_{W_1}^* = P_1 \frac{\Pi_{W_1}}{\Pi_1}; \quad \alpha_{\text{кpw}} = 18,1 \sqrt{T_{W_1}^*}; \quad \lambda_{W_1} = \frac{W_1}{\alpha_{\text{кpw}}}.$$

На этом расчет параметров для определенного диаметра \bar{D}_1 закончен; он повторяется для всех заданных диаметров.

Расчет параметров потока за рабочим колесом

I. Задан закон постоянства удельной работы ($\omega_4 = 0$).

Вычисляются окружная скорость, скорости закрутки потока, давление:

$$\bar{D}_2 = \frac{D_2}{D_{2cp}}; \quad U_2 = U_{1cp} \frac{D_{2cp}}{D_{1cp}} \bar{D}_2; \quad C_{2u} = \frac{L_{\tau u}}{U_2} - C_{1u} \frac{D_1}{D_2};$$

$$W_{2u} = U_2 + C_{2u}; \quad \Delta P_2 = \rho_{2cp} C_{2u}^2 \frac{\bar{D}-1}{\bar{D}+1}; \quad P_2 = P_{2cp} + \Delta P_2;$$

$$\Pi_{2S} = \Pi_{w1}^* \frac{P_2}{P_{w1}^*}.$$

Обращаются к подпрограмме № 4 ТД для определения температуры T_{2S}^* и к подпрограмме № I ТД для определения энтальпии i_{2S}^* .

Вычисляются относительные скорости, углы и энтальпия:

$$\Delta i_{w2S} = i_{w1}^* - i_{2S}; \quad W_{2S} = \sqrt{2 \Delta i_{w2S}}; \quad \lambda_{w2S} = \frac{W_{2S}}{C_{крw}};$$

$$W_2 = W_{2S} \Psi; \quad \Delta i_{w2} = \Delta i_{w2S} \Psi^2; \quad \beta_2 = \alpha z \cos \frac{W_{2u}}{W_2};$$

$$W_{2a} = W_2 \sin \beta_2; \quad C_2 = \sqrt{W_{2a}^2 + C_{2u}^2}; \quad \alpha_2 = \alpha z \cos \frac{C_{2u}}{C_2};$$

$$\Delta i_{c2} = \frac{C_2^2}{2}; \quad i_2 = i_{w1}^* - \Delta i_{w2}; \quad i_2^* = i_2 + \Delta i_{c2}.$$

Обращаются к подпрограмме № 3 ТД для определения температур T_2 и T_2^* . Вычисляются плотность и число λ $\rho_2 = \frac{P_2}{R T_2}$; $C_{кр2} = 18,3 \sqrt{T_2^*}$; $\lambda_{c2} = \frac{C_2}{C_{кр2}}$. На этом расчет для рассматриваемого диаметра \bar{D}_2 закончен

и далее он повторяется для всех заданных диаметров \bar{D}_2 .

2. Задан закон постоянства угла $\alpha_2 = \text{Const}$ ($\omega_4 = I$).

Вычисляются окружная скорость, давление и Π_1 — функция

$$\bar{D}_2 = \frac{D_2}{D_{2cp}}; \quad U_2 = U_{2cp} \bar{D}_2; \quad \Delta P_2 = \rho_{2cp} C_{2u,cp}^2 \frac{1}{\bar{D}_2^2 \cos^2 \alpha_2} \frac{\bar{D}-1}{\bar{D}+1};$$

$$P_2 = P_{2cp} + \Delta P_2; \quad \Pi_{2S} = \Pi_{w1}^* \frac{P_2}{P_{w1}^*}.$$

Обращаются к подпрограмме № 4 ТД для определения температуры T_{2S} и к подпрограмме № I ТД для определения энтальпии i_{2S} .

Вычисляются скорости в относительном движении и энтальпия:

$$\Delta i_{w2S} = i_{w1}^* - i_{2S}; \quad W_{2S} = \sqrt{2 \Delta i_{w2S}}; \quad \lambda_{w2S} = \frac{W_{2S}}{C_{крw}};$$

$$W_2 = \Psi W_{2S}; \quad \Delta i_{w2} = \Psi^2 \Delta i_{w2S}; \quad i_2 = i_{w1}^* - \Delta i_{w2}.$$

Обращаются к подпрограмме № 3 ТД для определения температуры T_2 .
 Рассчитываются плотность и скорости потока :

$$W_{2a} = \frac{C_{2a}}{D \cos^2 \alpha_2} \operatorname{tg} \alpha_2; \quad \beta_2 = \arcsin \frac{W_{2a}}{W_2}; \quad C_2 = \frac{W_{2a}}{\sin \alpha_2};$$

$$\Delta i_{c2} = -\frac{C_2^2}{2}; \quad i_2^* = i_2 + \Delta i_{c2}.$$

Обращаются к программе №3 ТД для определения температуры T_2

Вычисляются скорость звука и число λ

$$a_{кр2} = 18,1 \sqrt{T_2^*}; \quad \lambda_{c2} = \frac{C_2}{a_{кр2}}.$$

На этом заканчивается расчет для рассматриваемого диаметра

\bar{D}_2 и далее он повторяется для всех заданных диаметров \bar{D}_2 .

Л и т е р а т у р а

1. Мамаев Б.И. Газодинамический расчет осевой турбины. - Куйбышев: КуАИ, 1969.
2. Стенькин Е.Д. Аналитические выражения термодинамических Π, i - функций. - В сб.: Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей. - Куйбышев: КуАИ, вып. 76, 1976.
3. Стенькин Е.Д. Преобразование газодинамических функций для их вычисления на ЭВМ. - В сб.: Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей. - Куйбышев: КуАИ, вып. 58, 1974.
4. Аббяц В.К. Теория газовых турбин реактивных двигателей. - М.: Машиностроение, 1965.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

I. Обоснование необходимости использования ЭВМ	3
2. Принципы обучения и выполнения студентами курсовой работы с помощью ЭВМ	3
3. Последовательность выполнения работ	4
4. Термодинамическая подпрограмма № 1 ТД. Определение энтальпии газа i_α по заданной температуре T и величине, обратной коэффициенту избытка воздуха $\frac{1}{\alpha}$	6
5. Термодинамическая подпрограмма № 2 ТД. Определение Π -функции по заданным величинам T и $\frac{1}{\alpha}$	7
6. Термодинамическая подпрограмма № 3 ТД. Определение температуры газа T по заданным величинам i_α и $\frac{1}{\alpha}$	7
7. Термодинамическая подпрограмма № 4 ТД. Определение температуры газа T по заданным величинам Π_α и $\frac{1}{\alpha}$	8
8. Газодинамическая подпрограмма № 1 ГД. Определение расходной функции $q(\lambda)$ по заданным числу λ и показателю изоэнтропы K	9
9. Газодинамическая подпрограмма № 2 ГД. Определение функции $\Pi(\lambda)$ по заданному числу λ и показателю изоэнтропы K	10
10. Газодинамическая подпрограмма № 3 ГД . Определение числа λ по заданной функции $q(\lambda)$ и показателю изоэнтропы K	11
II. Газодинамическая подпрограмма № 4 ГД. Определение числа λ по заданной функции $\Pi(\lambda)$ и показателю изоэнтропы K	11

12. Программа № 1 Т. Предварительное определение основных размеров проточной части турбины.	12
13. Программа № 2 Т. Предварительный расчет параметров потока в сечениях между ступенями.	15
14. Программа № 3 Т. Расчет параметров в межвенцовых зазорах ступени турбины. . .	17
15. Программа № 4 Т. Расчет теплоперепада, КПД ступени и полных параметров за ней. .	24
16. Программа № 5 Т. Расчет КПД каскадов турбины и суммарного КПД процесса расширения.	26
17. Программа № 6 Т. Расчет параметров потока на различных радиусах проточной части турбины.	27
Литература	30

Составитель Евгений Дмитриевич С т е н ь к и н

**АЛГОРИТМЫ ПРОГРАММ И ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТОВ
С ПОМОЩЬЮ ЭВМ ПРИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ОСЕВОЙ ТУРБИНЫ**

Редактор Л.М.Б а л ы к о в а
Техн.редактор Н.М.К а л е н ю к
Корректор М.И. Л о г у н о в а

Подписано в печать 18.10.84.
формат 60x84 1/16. Бумага оберточная белая.
Оперативная печать. Усл.п.л. 2,09. Уч.-изд.л.2,0.
Т. 300 экз. Заказ 7817 Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. С.П.Королева, г.Куйбышев,
ул. Молодогвардейская, 151.

Офсетный участок КуАИ, г. Куйбышев, Ульяновская, 18.