

Спецификация библиотеки модулей "Упрощенный расчет ГТД"

Автор: Ткаченко Андрей Юрьевич

(ревизия: 2)

© Самарский университет, кафедра теории двигателей летательных аппаратов им. В.П. Лукачёва, 2025

Документ содержит описание расчетных модулей библиотеки "Упрощенный расчет ГТД", реализованных в среде концептуального проектирования газотурбинных силовых установок АСТРА-ГТД (версия ≥ 9.70).

Модули предназначены для формирования моделей упрощенного термодинамического расчета ГТД традиционных типов и схем.

Сокращения

ВД - высокое давление

ВУ - входное устройство

Вых. ус. - выходное устройство

ГТД - газотурбинный двигатель

ГТД СТ - газотурбинный двигатель со свободной турбиной

К - компрессор

КПД - коэффициент полезного действия

КС - камера сгорания

ЛА - летательный аппарат

НД - низкое давление

РК - рабочее колесо

СА - сопловой аппарат

СМ - камера смещения

СТ - свободная турбина

Т - турбина

ТВД - турбовинтовой двигатель

ТРД - турбореактивный двигатель

ТРДД - двухконтурный турбореактивный двигатель

ТРДДФсм - двухконтурный турбореактивный двигатель с форсажной камерой и смещением потоков

ТРДФ - турбореактивный двигатель с форсажной камерой

ФК - форсажная камера

II - наружный контур

Обозначение параметров

Обозначение	Название
a	скорость звука
C_ϵ	эффективный удельный расход топлива
$C_{уд}$	удельный расход топлива
C_Σ	эквивалентный удельный расход топлива
c	скорость
$c_{p,v}$	удельная изобарная теплоемкость воздуха
$c_{p,r}$	удельная изобарная теплоемкость продуктов сгорания
G	расход рабочего тела
G_B	расход воздуха через двигатель
$G_{т,ч}$	часовой расход топлива
g	удельный расход рабочего тела
g_t	относительный расход топлива
H_u	теплота сгорания топлива
k_v	показатель изоэнтропии воздуха
k_T	показатель изоэнтропии продуктов сгорания
L	удельная работа
M	число Маха
m	степень двухконтурности
N	мощность
N_ϵ	эффективная мощность двигателя
$N_{\epsilon,уд}$	удельная эффективная мощность двигателя
N_B	мощность на валу винта
N_Σ	эквивалентная мощность двигателя
$N_{\Sigma,уд}$	удельная эквивалентная мощность двигателя

Обозначение	Название
P	тяга
$P_{уд}$	удельная тяга двигателя
p	статическое давление
p^*	полное давление
R_B	газовая постоянная воздуха
R_T	газовая постоянная продуктов сгорания
T	статическая температура
T^*	полная температура
$V_{п}$	скорость полета
γ	относительный расход рабочего тела
η_e	эффективный КПД двигателя
η_m	коэффициент механических потерь
η_T	коэффициент полноты сгорания топлива
$\eta_{ред}$	коэффициент потерь мощности в редукторе
η_k^*	КПД компрессора
η_T^*	КПД турбины
λ	приведенная скорость рабочего тела
π_v	степень повышения давления скоростным напором
$\pi_{ср}$	располагаемая степень понижения давления в выходном устройстве
π_k^*	степень повышения давления в компрессоре
π_T^*	степень понижения давления в турбине
ρ	плотность рабочего тела
σ	коэффициент восстановления полного давления
ϕ_c	коэффициент скорости

Допущения

В основу построения алгоритмов модулей положены следующие допущения:

1. Топливо - авиационный керосин с теплотой сгорания

$$H_u = 42900, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

2. Теплофизические свойства рабочего тела принимаются постоянными:

- воздух:

$$c_{p,в} = 1,005, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$k_{в} = 1,40;$$

$$R_{в} = 0,287, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- продукты сгорания:

$$c_{p,г} = 1,157, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$k_{г} = 1,33;$$

$$R_{г} = 0,287, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

3. Отборы воздуха из проточной части осуществляются между компрессором и камерой сгорания.
4. При смешении потоков воздуха и продуктов сгорания результирующий поток имеет параметры продуктов сгорания.
5. Охлаждающий воздух, подводимый в проточную часть, имеет полное давление равное полному давлению основного потока.
6. Охлаждающий воздух, подводимый в турбине, условно разделяется на два потока:
 - поток, подмешиваемый к основному потоку перед 'горлом' СА первой ступени;
 - поток, подмешиваемый к основному потоку за 'горлом' РК последней ступени.
7. Расчет процесса расширения рабочего тела в охлаждаемой турбине осуществляется после подвода охлаждающего воздуха в 'горло' СА первой ступени и перед подводом охлаждающего воздуха в 'горло' РК последней ступени.
8. Процесс в выходном устройстве рассчитывается при условии полного расширения.

Модуль - Внешние условия

Задание параметров внешней среды: атмосферных и полетных условий. Расчет параметров потока на входе в двигатель.

Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
T_0	К	Температура атмосферного воздуха
p_0	кПа	Давление атмосферного воздуха
M_{Π}	-	Число Маха скорости полета

Выходные параметры

- Газовая постоянная воздуха:

$$R_{\text{в}} = 0,287, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Показатель изэнтропы воздуха:

$$k_{\text{в}} = 1,40.$$

- Плотность атмосферного воздуха:

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R_{\text{в}} \cdot T_0}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

- Скорость звука в атмосфере:

$$a_0 = \sqrt{k_{\text{в}} \cdot 1000 \cdot R_{\text{в}} \cdot T_0}, \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

- Скорость полета [м/с]:

$$V_{\Pi} = a_0 \cdot M_{\Pi}, \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

- Скорость полета [км/ч]:

$$V_{п.ч} = 3,6 \cdot V_{п}, \frac{\text{км}}{\text{ч}}.$$

- Степень повышения давления скоростным напором:

$$\pi_V = \left(1 + \frac{k_B - 1}{2} \cdot M_{п}^2\right)^{\frac{k_B}{k_B - 1}}.$$

- Относительный расход набегающего потока:

$$\gamma_0 = 1.$$

- Полная температура набегающего потока:

$$T_0^* = T_0 \cdot \left(1 + \frac{k_B - 1}{2} \cdot M_{п}^2\right), \text{ К}.$$

- Полное давление набегающего потока:

$$p_0^* = p_0 \cdot \pi_V, \text{ кПа}.$$

Код модуля

```
class E2S_11_Env extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S_Env # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Внешние условия # внеш-усл"
  note    = "Задание параметров внешней среды: атмосферных и полетных условий. Расчет параметров набегающего потока воздуха перед двигателем."
  //-----|-----|-----|-----|
  val t    = & TEMPERATURE_K      "T|0"      V 288.15    0 "Температура атмосферного воздуха"
  val p    = & PRESSURE_kPa        "p|0"      V 101.325   0 "Давление атмосферного воздуха"
  val d    = & DENSITY_kg_m3       "rho|0"    V 1.29      0 "Плотность атмосферного воздуха"
  val a    = & VELOCITY_m_s        "a|0"      V 340.0     0 "Скорость звука в атмосфере"
  val r_a  = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "R{в}"     V 0.287    x "Газовая постоянная воздуха"
  val k_a  = & COEFFICIENT         "k{в}"     V 1.4      x "Показатель изэнтропии воздуха"
  val mach = & MACH_NUMBER        "M{n}"     V 0.0      0 "Число Маха скорости полета"
```

```

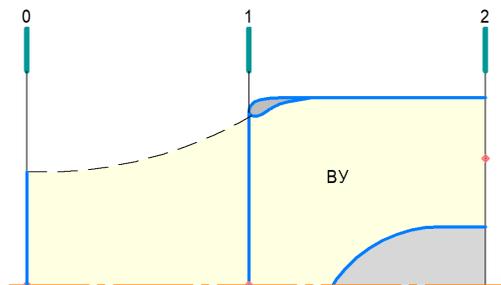
val v      = & VELOCITY_m_s      "V{n}"      V 0.0      0 "Скорость полета [м/с]"
val v_h    = & VELOCITY_km_h     "V{п.ч}"    V 0.0      0 "Скорость полета [км/ч]"
val pi_v   = & PRESSURE_RATIO    "π{v}"      V 1.0      0 "Степень повышения давления скоростным напором"
val gm     = & COEFFICIENT_REL   "γ|0"       V 1.0      0 "Относительный расход набегающего потока"
val ts     = & TEMPERATURE_K    "T*|0"      V 288.15   0 "Полная температура набегающего потока"
val ps     = & PRESSURE_kPa      "p*|0"      V 101.325  0 "Полное давление набегающего потока"
//-----|-----|-----|-----|
r_a       := 0.287
k_a       := 1.4
d         := p / ( r_a * t )
a         := root2( k_a * 1000.0 * r_a * t )
v         := a * mach
v_h       := 3.6 * v
pi_v      := power( 1.0 + 0.5 * ( k_a - 1.0 ) * mach * mach , k_a / ( k_a - 1.0 ) )
gm        := 1.0
ts        := t * ( 1.0 + 0.5 * ( k_a - 1.0 ) * mach * mach )
ps        := p * pi_v
}

```

Модуль - Входное устройство

Расчет параметров процесса во входном устройстве.

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
γ_0	-	Относительный расход набегающего потока
T_0^*	К	Полная температура набегающего потока
p_0^*	кПа	Полное давление набегающего потока
$\sigma_{вх}$	-	Коэффициент восстановления полного давления

Выходные параметры

- Относительный расход рабочего тела на выходе:

$$\gamma_2 = \gamma_0 \cdot$$

- Полная температура на выходе:

$$T_2^* = T_0^*, \text{ К} .$$

- Полное давление на выходе:

$$p_2^* = p_0^* \cdot \sigma_{\text{вх}}, \text{ кПа} .$$

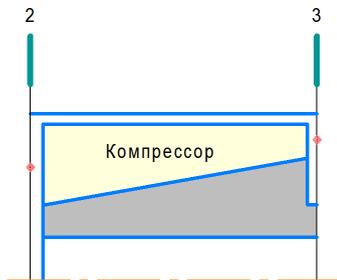
Код модуля

```
class E2S_12_Intake extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Intake # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Входное устройство # вы"
  note    = "Расчет параметров процесса во входном устройстве."
  //-----|-----|-----|-----|
  val gm_o  = & COEFFICIENT_REL      "γ|0"      V 1.0      x "Относительный расход набегающего потока"
  val ts_o  = & TEMPERATURE_K       "T*|0"     V 288.15   x "Полная температура набегающего потока"
  val ps_o  = & PRESSURE_kPa        "p*|0"     V 101.325  x "Полное давление набегающего потока"
  val sigma = & EFFICIENCY_SIGMA    "σ{вх}"    V 1.0      0 "Коэффициент восстановления полного давления"
  val gm_x  = & COEFFICIENT_REL      "γ|2"      V 1.0      0 "Относительный расход рабочего тела на выходе"
  val ts_x  = & TEMPERATURE_K       "T*|2"     V 288.15   0 "Полная температура на выходе"
  val ps_x  = & PRESSURE_kPa        "p*|2"     V 101.325  0 "Полное давление на выходе"
  //-----|-----|-----|-----|
  gm_x      := gm_o
  ts_x      := ts_o
  ps_x      := ps_o * sigma
}
```

Модуль - Компрессор

Расчет параметров процесса сжатия воздуха в компрессоре.

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
γ_2	-	Относительный расход рабочего тела на входе
T_2^*	К	Полная температура на входе
p_2^*	кПа	Полное давление на входе
π_k^*	-	Степень повышения давления
η_k^*	-	КПД компрессора

Выходные параметры

- Показатель изэнтропы воздуха:

$$k_{\text{в}} = 1,40.$$

- Изобарная теплоёмкость воздуха:

$$c_{p,\text{в}} = 1,005, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Удельная работа компрессора:

$$L_{\text{к}} = c_{p,\text{в}} \cdot T_2^* \cdot \left(\pi_{\text{к}}^{\frac{k_{\text{в}}-1}{k_{\text{в}}}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_{\text{к}}^*}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

- Относительный расход рабочего тела на выходе:

$$\gamma_3 = \gamma_2.$$

- Полная температура на выходе:

$$T_3^* = T_2^* + \frac{L_{\text{к}}}{c_{p,\text{в}}}, \text{К}.$$

- Полное давление на выходе:

$$p_3^* = p_2^* \cdot \pi_{\text{к}}^*, \text{кПа}.$$

Код модуля

```
class E2S_22_Compressor extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Compressor # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Компрессор # к"
  note    = "Расчет параметров процесса сжатия воздуха в компрессоре."
  //-----|-----|-----|-----|
  val gm_o = & COEFFICIENT_REL      "γ|2"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе"
  val ts_o  = & TEMPERATURE_K      "Т*|2"    V 288.15   x "Полная температура на входе"
  val ps_o  = & PRESSURE_kPa        "p*|2"    V 101.325  x "Полное давление на входе"
  val k_a   = & COEFFICIENT         "k{в}"    V 1.4      x "Показатель изэнтропии воздуха"
  val cp_a  = & ENERGY_J_SPEC_kg_K "c{p.в}"  V 1.005   x "Изобарная теплоёмкость воздуха"
  val pi    = & PRESSURE_RATIO      "π*{к}"   V 10.0     0 "Степень повышения давления"
  val eta   = & EFFICIENCY_ETA      "η*{к}"   V 0.85     0 "КПД компрессора"
```

```

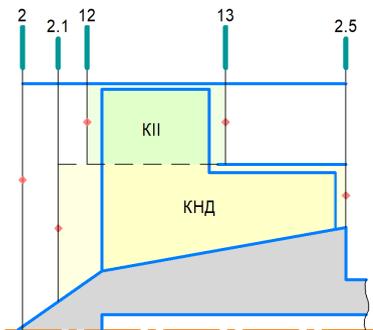
val lw      = & ENERGY_kJ_SPEC_kg      "L{k}"      V 300.0    0 "Удельная работа компрессора"
val gm_x    = & COEFFICIENT_REL          "γ|3"      V 1.0      0 "Относительный расход рабочего тела на выходе"
val ts_x    = & TEMPERATURE_K           "T*|3"     V 600.0    0 "Полная температура на выходе"
val ps_x    = & PRESSURE_kPa             "p*|3"     V 100.0    0 "Полное давление на выходе"
//-----|-----|-----|
k_a         := 1.4
cp_a        := 1.005
lw          := cp_a * ts_o * ( power( pi, ( k_a - 1.0 ) / k_a ) - 1.0 ) / eta
gm_x        := gm_o
ts_x        := ts_o + lw / cp_a
ps_x        := ps_o * pi
}

```

Модуль - Вентилятор

Расчет параметров процесса сжатия воздуха в вентиляторе ТРДД.

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
γ_2	-	Относительный расход рабочего тела на входе
T_2^*	К	Полная температура на входе
p_2^*	кПа	Полное давление на входе
m	-	Степень двухконтурности
$\pi_{кП}^*$	-	Степень повышения давления в наружном контуре
$\eta_{кП}^*$	-	КПД вентилятора в наружном контуре
$\pi_{кНД}^*$	-	Степень повышения давления во внутреннем контуре

Обозначение	Размерность	Описание
$\eta_{\text{кнд}}^*$	-	КПД вентилятора во внутреннем контуре

Выходные параметры

- Показатель изэнтропы воздуха:

$$k_{\text{в}} = 1,40.$$

- Изобарная теплоёмкость воздуха:

$$c_{p,\text{в}} = 1,005, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Относительный расход рабочего тела на входе в наружный контур:

$$\gamma_{12} = \gamma_2 \cdot \frac{m}{m+1}.$$

- Относительный расход рабочего тела на входе во внутренний контур:

$$\gamma_{2,1} = \gamma_2 \cdot \frac{1}{m+1}.$$

- Удельная работа вентилятора в наружном контуре:

$$L_{\text{кнд}} = c_{p,\text{в}} \cdot T_2^* \cdot \left(\pi_{\text{кнд}}^* \frac{k_{\text{в}}-1}{k_{\text{в}}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_{\text{кнд}}^*}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

- Относительный расход рабочего тела на выходе из наружного контура:

$$\gamma_{13} = \gamma_{12}.$$

- Полная температура на выходе из наружного контура:

$$T_{13}^* = T_2^* + \frac{L_{\text{кнд}}}{c_{p,\text{в}}}, \text{К}.$$

- Полное давление на выходе из наружного контура:

$$p_{13}^* = p_2^* \cdot \pi_{\text{кнд}}^*, \text{кПа}.$$

- Удельная работа вентилятора во внутреннем контуре:

$$L_{\text{кнд}} = c_{p,v} \cdot T_2^* \cdot \left(\pi_{\text{кнд}}^{\frac{k_a-1}{k_a}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_{\text{кнд}}^*}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

- Относительный расход рабочего тела на выходе из внутреннего контура:

$$\gamma_{2.5} = \gamma_{2.1}.$$

- Полная температура на выходе из внутреннего контура:

$$T_{2.5}^* = T_2^* + \frac{L_{\text{кнд}}}{c_{p,v}}, \text{ К}.$$

- Полное давление на выходе из внутреннего контура:

$$p_{2.5}^* = p_2^* \cdot \pi_{\text{кнд}}^*, \text{ кПа}.$$

Код модуля

```
class E2S_21_Fan extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Fan # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Вентилятор # вентилятор"
  note    = "Расчет параметров процесса сжатия воздуха в вентиляторе ТРДД."
  //-----|-----|-----|-----|
  val gm_o    = & COEFFICIENT_REL      "γ|2"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе"
  val ts_o    = & TEMPERATURE_K       "T*|2"     V 288.15   x "Полная температура на входе"
  val ps_o    = & PRESSURE_kPa         "p*|2"     V 101.325  x "Полное давление на входе"
  val k_a     = & COEFFICIENT          "k{в}"     V 1.4      x "Показатель изоэнтропии воздуха"
  val cp_a    = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "c{p.в}"   V 1.005   x "Изобарная теплоёмкость воздуха"
  val m       = & COEFFICIENT_REL      "m"        V 1.0      0 "Степень двухконтурности"
  val gm_II_o = & COEFFICIENT_REL      "γ|12"     V 0.5      0 "Относительный расход рабочего тела на входе в
  наружный контур"
  val gm_I_o  = & COEFFICIENT_REL      "γ|2.1"    V 0.5      0 "Относительный расход рабочего тела на входе во
  внутренний контур"
  val pi_II   = & PRESSURE_RATIO       "π*{кII}"  V 1.5      0 "Степень повышения давления в наружном контуре"
  val eta_II  = & EFFICIENCY_ETA       "η*{кII}"  V 0.88     0 "КПД вентилятора в наружном контуре"
  val lw_II   = & ENERGY_kJ_SPEC_kg  "L{кII}"   V 50.0     0 "Удельная работа вентилятора в наружном контуре"
```

```

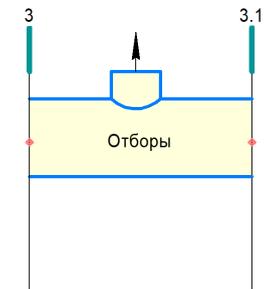
    val gm_II_x   = & COEFFICIENT_REL      "γ|13"           V 0.5      0 "Относительный расход рабочего тела на выходе из
наружного контура"
    val ts_II_x   = & TEMPERATURE_K       "Т*|13"         V 350.0    0 "Полная температура на выходе из наружного контура"
    val ps_II_x   = & PRESSURE_kPa        "p*|13"         V 150.0    0 "Полное давление на выходе из наружного контура"
    val pi__I     = & PRESSURE_RATIO      "π*{кнд}"       V 1.5      0 "Степень повышения давления во внутреннем контуре"
    val eta__I    = & EFFICIENCY_ETA      "η*{кнд}"       V 0.88     0 "КПД вентилятора во внутреннем контуре"
    val lw__I     = & ENERGY_kJ_SPEC_kg  "L{кнд}"        V 50.0     0 "Удельная работа вентилятора во внутреннем контуре"
    val gm_I_x    = & COEFFICIENT_REL      "γ|2.5"         V 0.5      0 "Относительный расход рабочего тела на выходе из
внутреннего контура"
    val ts_I_x    = & TEMPERATURE_K       "Т*|2.5"         V 350.0    0 "Полная температура на выходе из внутреннего контура"
    val ps_I_x    = & PRESSURE_kPa        "p*|2.5"         V 150.0    0 "Полное давление на выходе из внутреннего контура"
//-----|-----|-----|
k_a              := 1.4
cp_a             := 1.005
gm_II_o          := gm_o * m / ( m + 1.0 )
gm_I_o           := gm_o * 1.0 / ( m + 1.0 )
lw_II           := cp_a * ts_o * ( power( pi_II, ( k_a - 1.0 ) / k_a ) - 1.0 ) / eta_II
gm_II_x         := gm_II_o
ts_II_x         := ts_o + lw_II / cp_a
ps_II_x         := ps_o * pi_II
lw_I            := cp_a * ts_o * ( power( pi__I, ( k_a - 1.0 ) / k_a ) - 1.0 ) / eta_I
gm_I_x          := gm_I_o
ts_I_x          := ts_o + lw_I / cp_a
ps_I_x          := ps_o * pi__I
}

```

Модуль - Отборы

Учёт отборов воздуха.

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
γ_3	-	Относительный расход рабочего тела на входе
T_3^*	К	Полная температура на входе
p_3^*	кПа	Полное давление на входе
$g_{ла}$	-	Удельный расход воздуха, отбираемого на нужды ЛА
$g_{ут}$	-	Удельный расход утечек воздуха
$g_{ох.твд,са}$	-	Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение СА турбины ВД
$g_{ох.твд,рк}$	-	Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение РК турбины ВД
$g_{ох.тсд,са}$	-	Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение СА турбины СД
$g_{ох.тсд,рк}$	-	Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение РК турбины СД

Обозначение	Размерность	Описание
$g_{\text{ох.тнд.са}}$	-	Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение СА турбины НД
$g_{\text{ох.тнд.рк}}$	-	Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение РК турбины НД
$g_{\text{ох.тсв.са}}$	-	Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение СА свободной турбины
$g_{\text{ох.тсв.рк}}$	-	Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение РК свободной турбины

Выходные параметры

- Относительный расход воздуха, отбираемого на нужды ЛА:

$$\gamma_{\text{ла}} = \gamma_3 \cdot g_{\text{ла}} \cdot$$

- Относительный расход утечек воздуха:

$$\gamma_{\text{ут}} = \gamma_3 \cdot g_{\text{ут}} \cdot$$

- Относительный расход воздуха, отбираемого на охлаждение СА турбины ВД:

$$\gamma_{\text{ох.твд.са}} = \gamma_3 \cdot g_{\text{ох.твд.са}} \cdot$$

- Относительный расход воздуха, отбираемого на охлаждение РК турбины ВД:

$$\gamma_{\text{ох.твд.рк}} = \gamma_3 \cdot g_{\text{ох.твд.рк}} \cdot$$

- Относительный расход воздуха, отбираемого на охлаждение СА турбины СД:

$$\gamma_{\text{ох.тсд.са}} = \gamma_3 \cdot g_{\text{ох.тсд.са}} \cdot$$

- Относительный расход воздуха, отбираемого на охлаждение РК турбины СД:

$$\gamma_{\text{ох.тсд.рк}} = \gamma_3 \cdot g_{\text{ох.тсд.рк}} \cdot$$

- Относительный расход воздуха, отбираемого на охлаждение СА турбины НД:

$$\gamma_{\text{ох.тнд.са}} = \gamma_3 \cdot g_{\text{ох.тнд.са}} \cdot$$

- Относительный расход воздуха, отбираемого на охлаждение РК турбины НД:

$$\gamma_{\text{ох.тнд.рк}} = \gamma_3 \cdot g_{\text{ох.тнд.рк}} \cdot$$

- Относительный расход воздуха, отбираемого на охлаждение СА свободной турбины:

$$\gamma_{\text{ох.тсв.са}} = \gamma_3 \cdot g_{\text{ох.тсв.са}} \cdot$$

- Относительный расход воздуха, отбираемого на охлаждение ПК свободной турбины:

$$\gamma_{\text{ох.тсв.рк}} = \gamma_3 \cdot g_{\text{ох.тсв.рк}} \cdot$$

- Полная температура охлаждающего воздуха:

$$T_{\text{ох}}^* = T_3^*, \text{ K}.$$

- Относительный расход рабочего тела на выходе:

$$\gamma_{3.1} = \gamma_3 - (\gamma_{\text{ла}} + \gamma_{\text{ут}} + \gamma_{\text{ох.твд.са}} + \gamma_{\text{ох.твд.рк}} + \gamma_{\text{ох.тсд.са}} + \gamma_{\text{ох.тсд.рк}} + \gamma_{\text{ох.тнд.са}} + \gamma_{\text{ох.тнд.рк}} + \gamma_{\text{ох.тсв.са}} + \gamma_{\text{ох.тсв.рк}}).$$

- Полная температура на выходе:

$$T_{3.1}^* = T_3^*, \text{ K}.$$

- Полное давление на выходе:

$$p_{3.1}^* = p_3^*, \text{ кПа}.$$

Код модуля

```
class E2S_31_Coolant extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Coolant # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Отборы # отборы"
  note    = "Учёт отборов воздуха."

  //-----|-----|-----|-----|
  val gm_o      = & COEFFICIENT_REL      "γ|3"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе"
  val ts_o      = & TEMPERATURE_K       "T*|3"     V 600.0    x "Полная температура на входе"
  val ps_o      = & PRESSURE_kPa         "p*|3"     V 1000.0  x "Полное давление на входе"
  val gr_aux    = & COEFFICIENT_PART     "g{ла}"    V 0.0      0 "Удельный расход воздуха, отбираемого на нужды ЛА"
  val gr_bl     = & COEFFICIENT_PART     "g{ут}"    V 0.0      0 "Удельный расход утечек воздуха"
  val gr_hpt_sb = & COEFFICIENT_PART     "g{ох.твд.са}" V 0.0      0 "Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение
CA турбины ВД"
  val gr_hpt_rb = & COEFFICIENT_PART     "g{ох.твд.рк}" V 0.0      0 "Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение
ПК турбины ВД"
  val gr ipt_sb = & COEFFICIENT_PART     "g{ох.тсд.са}" V 0.0      0 "Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение
CA турбины СД"
```

```

    val gr_apt_rb = & COEFFICIENT_PART      "g{ox.тсд.рк}" V 0.0      0 "Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение
PK турбины СД"
    val gr_lpt_sb = & COEFFICIENT_PART      "g{ox.тнд.са}" V 0.0      0 "Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение
СА турбины НД"
    val gr_lpt_rb = & COEFFICIENT_PART      "g{ox.тнд.рк}" V 0.0      0 "Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение
PK турбины НД"
    val gr_fpt_sb = & COEFFICIENT_PART      "g{ox.тсв.са}" V 0.0      0 "Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение
СА свободной турбины"
    val gr_fpt_rb = & COEFFICIENT_PART      "g{ox.тсв.рк}" V 0.0      0 "Удельный расход воздуха, отбираемого на охлаждение
PK свободной турбины"
    val gm_aux    = & COEFFICIENT_REL       "γ{ла}"          V 0.0      0 "Относительный расход воздуха, отбираемого на нужды
ЛА"
    val gm__bl    = & COEFFICIENT_REL       "γ{ут}"          V 0.0      0 "Относительный расход утечек воздуха"
    val gm_hpt_sb = & COEFFICIENT_REL       "γ{ox.твд.са}"   V 0.0      0 "Относительный расход воздуха, отбираемого на
охлаждение СА турбины ВД"
    val gm_hpt_rb = & COEFFICIENT_REL       "γ{ox.твд.рк}"   V 0.0      0 "Относительный расход воздуха, отбираемого на
охлаждение PK турбины ВД"
    val gm_apt_sb = & COEFFICIENT_REL       "γ{ox.тсд.са}"   V 0.0      0 "Относительный расход воздуха, отбираемого на
охлаждение СА турбины СД"
    val gm_apt_rb = & COEFFICIENT_REL       "γ{ox.тсд.рк}"   V 0.0      0 "Относительный расход воздуха, отбираемого на
охлаждение PK турбины СД"
    val gm_lpt_sb = & COEFFICIENT_REL       "γ{ox.тнд.са}"   V 0.0      0 "Относительный расход воздуха, отбираемого на
охлаждение СА турбины НД"
    val gm_lpt_rb = & COEFFICIENT_REL       "γ{ox.тнд.рк}"   V 0.0      0 "Относительный расход воздуха, отбираемого на
охлаждение PK турбины НД"
    val gm_fpt_sb = & COEFFICIENT_REL       "γ{ox.тсв.са}"   V 0.0      0 "Относительный расход воздуха, отбираемого на
охлаждение СА свободной турбины"
    val gm_fpt_rb = & COEFFICIENT_REL       "γ{ox.тсв.рк}"   V 0.0      0 "Относительный расход воздуха, отбираемого на
охлаждение PK свободной турбины"
    val ts_cool   = & TEMPERATURE_K        "T*{ox}"         V 600.0    x "Полная температура охлаждающего воздуха"
    val gm_x      = & COEFFICIENT_REL       "γ|3.1"          V 1.0      0 "Относительный расход рабочего тела на выходе"
    val ts_x      = & TEMPERATURE_K        "T*|3.1"         V 600.0    0 "Полная температура на выходе"
    val ps_x      = & PRESSURE_kPa         "p*|3.1"         V 1000.0   0 "Полное давление на выходе"
//-----|-----|-----|-----|
gm_hpt_sb := gm_o * gr_hpt_sb
gm_hpt_rb := gm_o * gr_hpt_rb
gm_apt_sb := gm_o * gr_apt_sb
gm_apt_rb := gm_o * gr_apt_rb
gm_lpt_sb := gm_o * gr_lpt_sb
gm_lpt_rb := gm_o * gr_lpt_rb

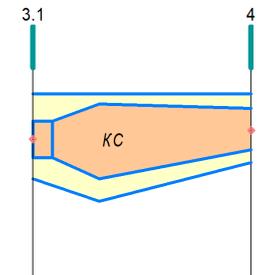
```

```
gm_fpt_sb      := gm_o * gr_fpt_sb
gm_fpt_rb      := gm_o * gr_fpt_rb
gm_aux         := gm_o * gr_aux
gm_bl         := gm_o * gr_bl
ts_cool        := ts_o
gm_x           := gm_o - gm_aux - gm_bl - gm_hpt_sb - gm_hpt_rb - gm_ipt_sb - gm_ipt_rb - gm_lpt_sb - gm_lpt_rb - gm_fpt_sb -
gm_fpt_rb
ts_x           := ts_o
ps_x           := ps_o
}
```

Модуль - Камера сгорания

Расчет параметров процесса подвода тепла в основной камере сгорания.

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
$\gamma_{3.1}$	-	Относительный расход рабочего тела на входе
$T_{3.1}^*$	К	Полная температура на входе
$p_{3.1}^*$	кПа	Полное давление на входе
$\sigma_{кс}$	-	Коэффициент восстановления полного давления
η_r	-	Коэффициент полноты сгорания топлива
T_4^*	К	Полная температура на выходе

Выходные параметры

- Изобарная теплоёмкость воздуха на входе:

$$c_{p,в} = 1,005, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания на выходе:

$$c_{p,г} = 1,157, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Теплота сгорания топлива:

$$H_u = 42900, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Относительный расход топлива:

$$g_T = \frac{c_{p,г} \cdot T_4^* - c_{p,в} \cdot T_{3.1}^*}{H_u \cdot \eta_T}.$$

- Относительный расход рабочего тела на выходе:

$$\gamma_4 = \gamma_{3.1} \cdot (1 + g_T).$$

- Полное давление на выходе:

$$p_4^* = p_{3.1}^* \cdot \sigma_{кс}, \text{кПа}.$$

Код модуля

```
class E25_35_Burner extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E25 Burner # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Камера сгорания # кс"
  note    = "Расчет параметров процесса подвода тепла в основной камере сгорания."
  //-----|-----|-----|-----|
  val gm_o = & COEFFICIENT_REL      "γ|3.1"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе"
  val ts_o  = & TEMPERATURE_K      "Т*|3.1"   V 600.0    x "Полная температура на входе"
  val ps_o  = & PRESSURE_kPa        "p*|3.1"   V 1000.0   x "Полное давление на входе"
  val cp_a  = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "c{p.в}"   V 1.005    x "Изобарная теплоёмкость воздуха на входе"
```

```

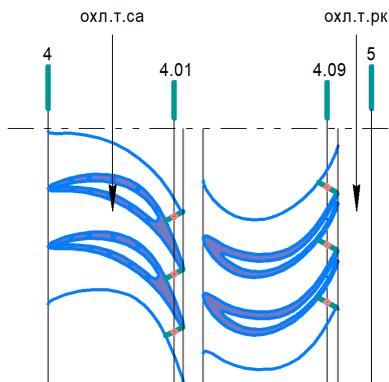
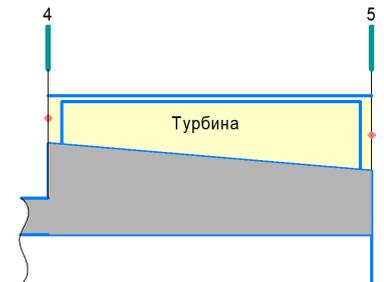
val cp_cg      = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K      "c{p,r}"          V 1.157      x "Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания на выходе"
val hu         = & ENERGY_kJ_SPEC_kg        "H{u}"           D 0          V 42900.0    x "Теплота сгорания топлива"
val sigma      = & EFFICIENCY_SIGMA          "σ{кс}"          V 0.95       0 "Коэффициент восстановления полного давления"
val eff        = & EFFICIENCY_ENERGY         "η{r}"           V 0.99       0 "Коэффициент полноты сгорания топлива"
val gf_rel     = & COEFFICIENT_REL           "g{r}"           V 0.01       0 "Относительный расход топлива"
val gm_x       = & COEFFICIENT_REL           "γ|4"            V 1.0        0 "Относительный расход рабочего тела на выходе"
val ts_x       = & TEMPERATURE_K             "T*|4"           V 1400.0     0 "Полная температура на выходе"
val ps_x       = & PRESSURE_kPa              "p*|4"           V 1000.0     0 "Полное давление на выходе"
//-----|-----|-----|
cp_a           := 1.005
cp_cg          := 1.157
hu             := 42900.0
gf_rel        := ( cp_cg * ts_x - cp_a * ts_o ) / ( hu * eff )
gm_x           := gm_o * ( 1.0 + gf_rel )
ps_x           := ps_o * sigma
}

```

Модуль - Турбина

Расчет параметров процесса расширения воздуха в турбине.

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
γ_4	-	Относительный расход рабочего тела на входе
T_4^*	К	Полная температура на входе
p_4^*	кПа	Полное давление на входе
$T_{ох}^*$	К	Полная температура охлаждающего воздуха
$\gamma_{ох.т.са}$	-	Относительный расход воздуха, поступающего на охлаждение СА
$\gamma_{ох.т.рк}$	-	Относительный расход воздуха, поступающего на охлаждение РК
L_k	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Удельная работа компрессора
γ_2	-	Относительный расход рабочего тела на входе в компрессор
η_m	-	Кoeffициент механических потерь
η_t^*	-	КПД турбины

Выходные параметры

- Показатель изоэнтропы продуктов сгорания:

$$k_T = 1,33.$$

- Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания:

$$c_{p,T} = 1,157, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Изобарная теплоёмкость воздуха:

$$c_{p,v} = 1,005, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Относительный расход в 'горле' СА первой ступени:

$$\gamma_{4.01} = \gamma_4 + \gamma_{ох.т.са}.$$

- Полная температура в 'горле' СА первой ступени:

$$T_{4,01}^* = \frac{\gamma_4 \cdot c_{p,r} \cdot T_4^* + \gamma_{\text{ох.т.са}} \cdot c_{p,в} \cdot T_{\text{ох}}^*}{\gamma_{4,01} \cdot c_{p,r}}, \text{ К}.$$

- Удельная работа турбины:

$$L_T = \frac{\gamma_2 \cdot L_K}{\gamma_{4,01} \cdot \eta_m}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

- Степень понижения давления в турбине:

$$\pi_T^* = \left(1 - \frac{L_T}{c_{p,r} \cdot T_{4,01}^* \cdot \eta_T^*} \right)^{\frac{-\kappa}{\kappa-1}}.$$

- Относительный расход в 'горле' РК последней ступени:

$$\gamma_{4,09} = \gamma_{4,01}.$$

- Полная температура в 'горле' РК последней ступени:

$$T_{4,09}^* = T_{4,01}^* - \frac{L_T}{c_{p,r}}, \text{ К}.$$

- Относительный расход рабочего тела на выходе:

$$\gamma_5 = \gamma_{4,09} + \gamma_{\text{ох.т.рк}}.$$

- Полная температура в 'горле' РК последней ступени:

$$T_5^* = \frac{\gamma_{4,09} \cdot c_{p,r} \cdot T_{4,09}^* + \gamma_{\text{ох.т.рк}} \cdot c_{p,в} \cdot T_{\text{ох}}^*}{\gamma_5 \cdot c_{p,r}}, \text{ К}.$$

- Полное давление на выходе:

$$p_5^* = \frac{p_4^*}{\pi_T^*}, \text{ кПа}.$$

```

class E2S_41_Turbine extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Turbine # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Турбина # τ"
  note    = "Расчет параметров процесса расширения воздуха в турбине."
  //-----|-----|-----|-----|
  val gm_o      = & COEFFICIENT_REL      "γ|4"          V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе"
  val ts_o      = & TEMPERATURE_K        "T*|4"         V 1400.0   x "Полная температура на входе"
  val ps_o      = & PRESSURE_kPa          "p*|4"         V 1000.0   x "Полное давление на входе"
  val k_cg      = & COEFFICIENT          "k{τ}"         V 1.33     x "Показатель изоэнтропы продуктов сгорания"
  val cp_cg     = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "c{p.r}"       V 1.157   x "Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания"
  val ts_cool   = & TEMPERATURE_K        "T*{ох}"       V 600.0    x "Полная температура охлаждающего воздуха"
  val gm_cool_sb = & COEFFICIENT_REL      "γ{ох.т.са}"   V 0.0      x "Относительный расход воздуха, поступающего на
охлаждение СА"
  val gm_cool_rb = & COEFFICIENT_REL      "γ{ох.т.рк}"   V 0.0      x "Относительный расход воздуха, поступающего на
охлаждение РК"
  val cp_a      = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "c{p.в}"       V 1.005   x "Изобарная теплоёмкость воздуха"
  val gm_th     = & COEFFICIENT_REL      "γ|4.01"       V 1.0      0 "Относительный расход в 'горле' СА первой ступени"
  val ts_th     = & TEMPERATURE_K        "T*|4.01"      V 1400.0   0 "Полная температура в 'горле' СА первой ступени"
  val lw_c      = & ENERGY_kJ_SPEC_kg   "L{k}"         V 300.0    x "Удельная работа компрессора"
  val gm_c      = & COEFFICIENT_REL      "γ|2"          V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе в
компрессор"
  val eff_m     = & EFFICIENCY_POWER      "η{м}"         V 0.995    0 "Коэффициент механических потерь"
  val pi        = & PRESSURE_RATIO        "π*{τ}"       V 2.0      0 "Степень понижения давления в турбине"
  val eta       = & EFFICIENCY_ETA        "η*{τ}"       V 0.89     0 "КПД турбины"
  val lw_t      = & ENERGY_kJ_SPEC_kg   "L{τ}"         V 300.0    0 "Удельная работа турбины"
  val gm_rb     = & COEFFICIENT_REL      "γ|4.09"       V 1.0      0 "Относительный расход в 'горле' РК последней ступени"
  val ts_rb     = & TEMPERATURE_K        "T*|4.09"      V 1100.0   0 "Полная температура в 'горле' РК последней ступени"
  val gm_x      = & COEFFICIENT_REL      "γ|5"          V 1.0      0 "Относительный расход рабочего тела на выходе"
  val ts_x      = & TEMPERATURE_K        "T*|5"         V 1100.0   0 "Полная температура на выходе"
  val ps_x      = & PRESSURE_kPa          "p*|5"         V 500.0    0 "Полное давление на выходе"
  //-----|-----|-----|-----|
  k_cg        := 1.33
  cp_cg       := 1.157
  cp_a        := 1.005
  gm_th       := gm_o + gm_cool_sb
  ts_th       := ( gm_o * cp_cg * ts_o + gm_cool_sb * cp_a * ts_cool ) / ( gm_th * cp_cg )
  lw_t        := gm_c * lw_c / ( gm_th * eff_m )
  pi          := power( 1.0 - lw_t / ( cp_cg * ts_th * eta ) , -k_cg / ( k_cg - 1.0 ) )
  gm_rb       := gm_th
  ts_rb       := ts_th - lw_t / cp_cg

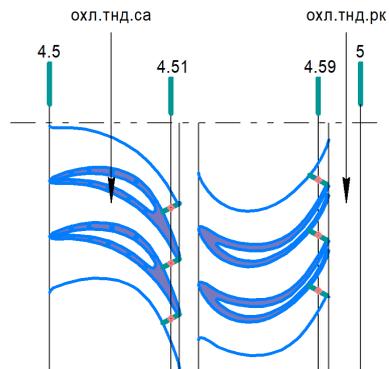
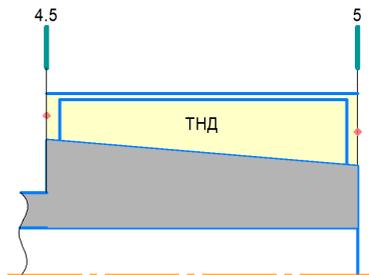
```

```
gm_x := gm_rb + gm_cool_rb
ts_x := ( gm_rb * cp_cg * ts_rb + gm_cool_rb * cp_a * ts_cool ) / ( gm_x * cp_cg )
ps_x := ps_o / pi
}
```

Модуль - Турбина вентилятора

Расчет параметров процесса расширения воздуха в турбине вентилятора ТРДД.

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
$\gamma_{4.5}$	-	Относительный расход рабочего тела на входе
$T_{4.5}^*$	К	Полная температура на входе
$p_{4.5}^*$	кПа	Полное давление на входе
$T_{ох}^*$	К	Полная температура охлаждающего воздуха
$\gamma_{ох.гнд.са}$	-	Относительный расход воздуха, поступающего на охлаждение СА
$\gamma_{ох.гнд.рк}$	-	Относительный расход воздуха, поступающего на охлаждение РК
$L_{кп}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Удельная работа наружного контура вентилятора
γ_{12}	-	Относительный расход рабочего тела на входе в наружный контур
$L_{кнд}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Удельная работа внутреннего контура вентилятора
$\gamma_{2.1}$	-	Относительный расход рабочего тела на входе во внутренний контур
$\eta_{м.нд}$	-	Коэффициент механических потерь
$\eta_{гнд}^*$	-	КПД турбины

Выходные параметры

- Показатель изоэнтропы продуктов сгорания:

$$k_r = 1,33.$$

- Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания:

$$c_{p,r} = 1,157, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Изобарная теплоёмкость воздуха:

$$c_{p,в} = 1,005, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Относительный расход в 'горле' СА первой ступени:

$$\gamma_{4.51} = \gamma_{4.5} + \gamma_{\text{ок.тнд.са}} \cdot$$

- Полная температура в 'горле' СА первой ступени:

$$T_{4.51}^* = \frac{\gamma_{4.5} \cdot c_{p,\Gamma} \cdot T_{4.5}^* + \gamma_{\text{ок.т.са}} \cdot c_{p,\text{в}} \cdot T_{\text{ок}}^*}{\gamma_{4.51} \cdot c_{p,\Gamma}}, \text{ К}.$$

- Удельная работа турбины:

$$L_{\text{тнд}} = \frac{\gamma_{12} \cdot L_{\text{кП}} + \gamma_{2.1} \cdot L_{\text{кнд}}}{\gamma_{4.51} \cdot \eta_{\text{м.нд}}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

- Степень понижения давления в турбине:

$$\pi_{\text{тнд}}^* = \left(1 - \frac{L_{\text{тнд}}}{c_{p,\Gamma} \cdot T_{4.51}^* \cdot \eta_{\text{тнд}}^*} \right)^{\frac{-\gamma_{\text{т}}}{\gamma_{\text{т}} - 1}}.$$

- Относительный расход в 'горле' РК последней ступени:

$$\gamma_{4.59} = \gamma_{4.51} \cdot$$

- Полная температура в 'горле' РК последней ступени:

$$T_{4.59}^* = T_{4.51}^* - \frac{L_{\text{тнд}}}{c_{p,\Gamma}}, \text{ К}.$$

- Относительный расход рабочего тела на выходе:

$$\gamma_5 = \gamma_{4.59} + \gamma_{\text{ок.тнд.рк}} \cdot$$

- Полная температура в 'горле' РК последней ступени:

$$T_5^* = \frac{\gamma_{4.59} \cdot c_{p,\Gamma} \cdot T_{4.59}^* + \gamma_{\text{ок.тнд.рк}} \cdot c_{p,\text{в}} \cdot T_{\text{ок}}^*}{\gamma_5 \cdot c_{p,\Gamma}}, \text{ К}.$$

- Полное давление на выходе:

$$p_5^* = \frac{p_{4.5}^*}{\pi_{\text{тнд}}^*}, \text{ кПа}.$$

Код модуля

```
class E2S_42_Turbine_Fan extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Turbine-Fan # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Турбина вентилятора # тнд"
  note    = "Расчет параметров процесса расширения воздуха в турбине вентилятора ТРДД."
  //-----|-----|-----|-----|
  val gm_o    = & COEFFICIENT_REL      "γ|4.5"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе"
  val ts_o    = & TEMPERATURE_K        "Т*|4.5"     V 1400.0   x "Полная температура на входе"
  val ps_o    = & PRESSURE_kPa          "p*|4.5"     V 1000.0   x "Полное давление на входе"
  val k_cg    = & COEFFICIENT           "κ{г}"       V 1.33     x "Показатель изоэнтропии продуктов сгорания"
  val cp_cg   = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "c{p.г}"     V 1.157   x "Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания"
  val ts_cool = & TEMPERATURE_K        "Т*{ох}"     V 600.0    x "Полная температура охлаждающего воздуха"
  val gm_cool_sb = & COEFFICIENT_REL    "γ{ох.тнд.са}" V 0.0      x "Относительный расход воздуха, поступающего на
охлаждение СА"
  val gm_cool_rb = & COEFFICIENT_REL    "γ{ох.тнд.рк}" V 0.0      x "Относительный расход воздуха, поступающего на
охлаждение РК"
  val cp_a    = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "c{p.в}"     V 1.005   x "Изобарная теплоёмкость воздуха"
  val gm_th   = & COEFFICIENT_REL      "γ|4.51"     V 1.0      0 "Относительный расход в 'горле' СА первой ступени"
  val ts_th   = & TEMPERATURE_K        "Т*|4.51"     V 1400.0   0 "Полная температура в 'горле' СА первой ступени"
  val lw_c_II = & ENERGY_kJ_SPEC_kg    "L{κII}"     V 50.0     x "Удельная работа наружного контура вентилятора"
  val gm_c_II = & COEFFICIENT_REL      "γ|12"       V 0.5      x "Относительный расход рабочего тела на входе в
наружный контур"
  val lw_c_I  = & ENERGY_kJ_SPEC_kg    "L{κнд}"     V 50.0     x "Удельная работа внутреннего контура вентилятора"
  val gm_c_I  = & COEFFICIENT_REL      "γ|2.1"     V 0.5      x "Относительный расход рабочего тела на входе во
внутренний контур"
  val eff_m   = & EFFICIENCY_POWER      "η{м.нд}"     V 1.0      0 "Коэффициент механических потерь"
  val pi     = & PRESSURE_RATIO         "π*{тнд}"     V 4.0      0 "Степень понижения давления в турбине"
  val eta    = & EFFICIENCY_ETA        "η*{тнд}"     V 0.91     0 "КПД турбины"
  val lw_t   = & ENERGY_kJ_SPEC_kg    "L{тнд}"     V 300.0   0 "Удельная работа турбины"
  val gm_rb  = & COEFFICIENT_REL      "γ|4.59"     V 1.0      0 "Относительный расход в 'горле' РК последней ступени"
  val ts_rb  = & TEMPERATURE_K        "Т*|4.59"     V 1100.0   0 "Полная температура в 'горле' РК последней ступени"
  val gm_x   = & COEFFICIENT_REL      "γ|5"        V 1.0      0 "Относительный расход рабочего тела на выходе"
  val ts_x   = & TEMPERATURE_K        "Т*|5"        V 1100.0   0 "Полная температура на выходе"
  val ps_x   = & PRESSURE_kPa          "p*|5"        V 500.0    0 "Полное давление на выходе"
  //-----|-----|-----|-----|
  k_cg      := 1.33
  cp_cg     := 1.157
  cp_a      := 1.005
}
```

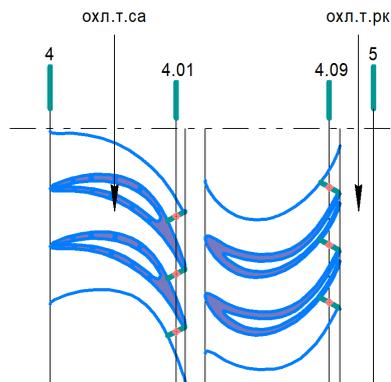
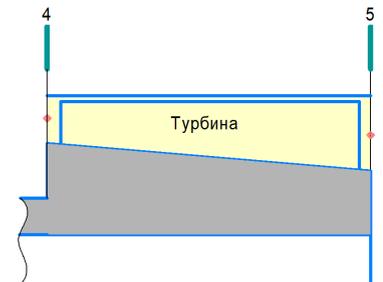
```
gm_th := gm_o + gm_cool_sb
ts_th := ( gm_o * cp_cg * ts_o + gm_cool_sb * cp_a * ts_cool ) / ( gm_th * cp_cg )
lw_t := ( gm_c_II * lw_c_II + gm_c_I * lw_c_I ) / ( gm_th * eff_m )
pi := power( 1.0 - lw_t / ( cp_cg * ts_th * eta ) , -k_cg / ( k_cg - 1.0 ) )
gm_rb := gm_th
ts_rb := ts_th - lw_t / cp_cg
gm_x := gm_rb + gm_cool_rb
ts_x := ( gm_rb * cp_cg * ts_rb + gm_cool_rb * cp_a * ts_cool ) / ( gm_x * cp_cg )
ps_x := ps_o / pi
```

```
}
```

Модуль - Турбина турбовинтового двигателя

Расчет параметров процесса расширения в турбине турбовинтового двигателя, вращающей компрессор и винт.

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
γ_4	-	Относительный расход рабочего тела на входе
T_4^*	К	Полная температура на входе
p_4^*	кПа	Полное давление на входе
$T_{ох}^*$	К	Полная температура охлаждающего воздуха
$\gamma_{ох.т.са}$	-	Относительный расход воздуха, поступающего на охлаждение СА
$\gamma_{ох.т.рк}$	-	Относительный расход воздуха, поступающего на охлаждение РК
L_k	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Удельная работа компрессора
γ_2	-	Относительный расход рабочего тела на входе в компрессор
p_0	кПа	Давление атмосферного воздуха
$\pi_{ср}$	-	Располагаемая степень понижения давления в выходном устройстве
η_m	-	Кoeffициент механических потерь
η_T^*	-	КПД турбины

Выходные параметры

- Показатель изэнтропы продуктов сгорания:

$$k_T = 1,33.$$

- Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания:

$$c_{p,T} = 1,157, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Изобарная теплоёмкость воздуха:

$$c_{p,B} = 1,005, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Относительный расход в 'горле' СА первой ступени:

$$\gamma_{4.01} = \gamma_4 + \gamma_{\text{ох.т.са}} \cdot$$

- Полная температура в 'горле' СА первой ступени:

$$T_{4.01}^* = \frac{\gamma_4 \cdot c_{p,r} \cdot T_4^* + \gamma_{\text{ох.т.са}} \cdot c_{p,v} \cdot T_{\text{ох}}^*}{\gamma_{4.01} \cdot c_{p,r}}, \text{ К}.$$

- Степень понижения давления в турбине:

$$\pi_T^* = \frac{p_4^*}{p_0 \cdot \pi_{\text{ср}}}.$$

- Удельная работа турбины:

$$L_T = c_{p,r} \cdot T_{4.01}^* \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_T^{*\frac{k_T-1}{k_T}}} \right) \cdot \eta_T^*, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

- Удельная эффективная мощность двигателя:

$$N_{\text{е.уд}} = \gamma_{4.01} \cdot L_T \cdot \eta_m - \gamma_2 \cdot L_K, \frac{\text{кВт} \cdot \text{с}}{\text{кг}}.$$

- Относительный расход в 'горле' РК последней ступени:

$$\gamma_{4.09} = \gamma_{4.01} \cdot$$

- Полная температура в 'горле' РК последней ступени:

$$T_{4.09}^* = T_{4.01}^* - \frac{L_T}{c_{p,r}}, \text{ К}.$$

- Относительный расход рабочего тела на выходе:

$$\gamma_5 = \gamma_{4.09} + \gamma_{\text{ох.т.рк}} \cdot$$

- Полная температура в 'горле' РК последней ступени:

$$T_5^* = \frac{\gamma_{4.09} \cdot c_{p,r} \cdot T_{4.09}^* + \gamma_{\text{ох.т.рк}} \cdot c_{p,v} \cdot T_{\text{ох}}^*}{\gamma_5 \cdot c_{p,r}}, \text{ К}.$$

- Полное давление на выходе:

$$p_5^* = \frac{p_4^*}{\pi_T^*}, \text{ кПа.}$$

Код модуля

```

class E2S_43_Turbine_Prop extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Turbine-Prop # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Турбина турбовинтового двигателя # т"
  note    = "Расчет параметров процесса расширения в турбине турбовинтового двигателя, вращающей компрессор и винт."
  //-----|-----|-----|-----|
  val gm_o      = & COEFFICIENT_REL      "γ|4"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе"
  val ts_o      = & TEMPERATURE_K        "T*|4"     V 1400.0   x "Полная температура на входе"
  val ps_o      = & PRESSURE_kPa          "p*|4"     V 1000.0   x "Полное давление на входе"
  val k_cg      = & COEFFICIENT           "k{r}"     V 1.33     x "Показатель изоэнтропы продуктов сгорания"
  val cp_cg     = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "c{p.r}"   V 1.157    x "Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания"
  val ts_cool   = & TEMPERATURE_K        "T*{ox}"   V 600.0    x "Полная температура охлаждающего воздуха"
  val gm_cool_sb = & COEFFICIENT_REL      "γ{ox.t.ca}" V 0.0      x "Относительный расход воздуха, поступающего на
охлаждение СА"
  val gm_cool_rb = & COEFFICIENT_REL      "γ{ox.t.pk}" V 0.0      x "Относительный расход воздуха, поступающего на
охлаждение ПК"
  val cp_a      = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "c{p.a}"   V 1.005    x "Изобарная теплоёмкость воздуха"
  val gm_th     = & COEFFICIENT_REL      "γ|4.01"   V 1.0      0 "Относительный расход в 'горле' СА первой ступени"
  val ts_th     = & TEMPERATURE_K        "T*|4.01"   V 1400.0   0 "Полная температура в 'горле' СА первой ступени"
  val lw_c      = & ENERGY_kJ_SPEC_kg   "L{k}"     V 300.0    x "Удельная работа компрессора"
  val gm_c      = & COEFFICIENT_REL      "γ|2"     V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе в
компрессор"
  val p_0       = & PRESSURE_kPa          "p|0"     V 101.325  x "Давление атмосферного воздуха"
  val pi_na     = & PRESSURE_RATIO        "π{cp}"   V 1.25     0 "Располагаемая степень понижения давления в выходном
устройстве"
  val eff_m     = & EFFICIENCY_POWER      "η{m}"     V 1.0      0 "Коэффициент механических потерь"
  val pi        = & PRESSURE_RATIO        "π*{т}"   V 4.0      0 "Степень понижения давления в турбине"
  val eta       = & EFFICIENCY_ETA        "η*{т}"   V 0.90     0 "КПД турбины"
  val lw_t      = & ENERGY_kJ_SPEC_kg   "L{т}"     V 300.0    0 "Удельная работа турбины"
  val pwr_e_spc = & POWER_kw_SPEC_kg_s    "N{e.уд}" V 300.0    0 "Удельная эффективная мощность двигателя"
  val gm_rb     = & COEFFICIENT_REL      "γ|4.09"   V 1.0      0 "Относительный расход в 'горле' РК последней ступени"
  val ts_rb     = & TEMPERATURE_K        "T*|4.09" V 1100.0   0 "Полная температура в 'горле' РК последней ступени"
  val gm_x      = & COEFFICIENT_REL      "γ|5"     V 1.0      0 "Относительный расход рабочего тела на выходе"

```

```

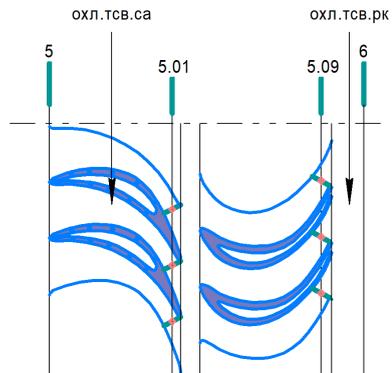
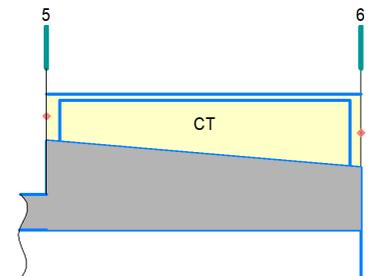
val ts_x      = & TEMPERATURE_K      "T*|5"      V 1100.0  0 "Полная температура на выходе"
val ps_x      = & PRESSURE_kPa        "p*|5"      V 500.0   0 "Полное давление на выходе"
//-----|-----|-----|-----|
k_cg          := 1.33
cp_cg         := 1.157
cp_a          := 1.005
gm_th         := gm_o + gm_cool_sb
ts_th         := ( gm_o * cp_cg * ts_o + gm_cool_sb * cp_a * ts_cool ) / ( gm_th * cp_cg )
pi            := ps_o / ( p_0 * pi_na )
lw_t          := cp_cg * ts_th * ( 1.0 - 1.0 / power( pi , ( k_cg - 1.0 ) / k_cg ) ) * eta
pwr_e_spc     := gm_th * lw_t * eff_m - gm_c * lw_c
gm_rb         := gm_th
ts_rb         := ts_th - lw_t / cp_cg
gm_x          := gm_rb + gm_cool_rb
ts_x          := ( gm_rb * cp_cg * ts_rb + gm_cool_rb * cp_a * ts_cool ) / ( gm_x * cp_cg )
ps_x          := ps_o / pi
}

```

Модуль - Турбина свободная

Расчет параметров процесса расширения в свободной турбине ГТД СТ.

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
γ_5	-	Относительный расход рабочего тела на входе
T_5^*	К	Полная температура на входе
p_5^*	кПа	Полное давление на входе
$T_{ох}^*$	К	Полная температура охлаждающего воздуха
$\gamma_{ох.тсв,са}$	-	Относительный расход воздуха, поступающего на охлаждение СА
$\gamma_{ох.тсв,рк}$	-	Относительный расход воздуха, поступающего на охлаждение РК
p_0	кПа	Давление атмосферного воздуха
$\pi_{ср}$	-	Располагаемая степень понижения давления в выходном устройстве
$\eta_{м.св}$	-	Кoeffициент механических потерь
$\eta_{тсв}^*$	-	КПД турбины

Выходные параметры

- Показатель изоэнтропы продуктов сгорания:

$$k_r = 1,33.$$

- Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания:

$$c_{p,r} = 1,157, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Изобарная теплоёмкость воздуха:

$$c_{p,v} = 1,005, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Относительный расход в 'горле' СА первой ступени:

$$\gamma_{5.01} = \gamma_5 + \gamma_{ох.тсв,са}.$$

- Полная температура в 'горле' СА первой ступени:

$$T_{5,01}^* = \frac{\gamma_5 \cdot c_{p,г} \cdot T_5^* + \gamma_{\text{ох.тсв.са}} \cdot c_{p,в} \cdot T_{\text{ох}}^*}{\gamma_{5,01} \cdot c_{p,г}}, \text{ К}.$$

- Степень понижения давления в турбине:

$$\pi_{\text{тсв}}^* = \frac{p_5^*}{p_0 \cdot \pi_{\text{ср}}}.$$

- Удельная работа турбины:

$$L_{\text{тсв}} = c_{p,г} \cdot T_{5,01}^* \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_{\text{тсв}}^{\frac{k_p}{k_g}}} \right) \cdot \eta_{\text{тсв}}^*, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

- Удельная эффективная мощность двигателя:

$$N_{\text{е.уд}} = \gamma_{5,01} \cdot L_{\text{тсв}} \cdot \eta_{\text{м.св}}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{с}}{\text{кг}}.$$

- Относительный расход в 'горле' РК последней ступени:

$$\gamma_{5,09} = \gamma_{5,01}.$$

- Полная температура в 'горле' РК последней ступени:

$$T_{5,09}^* = T_{5,01}^* - \frac{L_{\text{тсв}}}{c_{p,г}}, \text{ К}.$$

- Относительный расход рабочего тела на выходе:

$$\gamma_6 = \gamma_{5,09} + \gamma_{\text{ох.тсв.рк}}.$$

- Полная температура в 'горле' РК последней ступени:

$$T_6^* = \frac{\gamma_{5,09} \cdot c_{p,г} \cdot T_{5,09}^* + \gamma_{\text{ох.тсв.рк}} \cdot c_{p,в} \cdot T_{\text{ох}}^*}{\gamma_6 \cdot c_{p,г}}, \text{ К}.$$

- Полное давление на выходе:

$$p_6^* = \frac{p_5^*}{\pi_{\text{тсв}}^*}, \text{ кПа}.$$

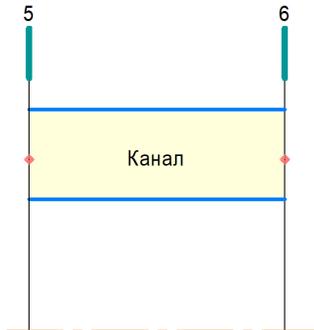
Код модуля

```
class E2S_44_Turbine_Free extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Turbine-Free # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Турбина свободная # тсв"
  note    = "Расчет параметров процесса расширения в свободной турбине ГТД СТ."
  //-----|-----|-----|-----|
  val gm_o    = & COEFFICIENT_REL      "γ|5"          V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе"
  val ts_o    = & TEMPERATURE_K        "Т*|5"        V 1400.0   x "Полная температура на входе"
  val ps_o    = & PRESSURE_kPa         "p*|5"        V 1000.0   x "Полное давление на входе"
  val k_cg    = & COEFFICIENT          "k{r}"        V 1.33     x "Показатель изоэнтропии продуктов сгорания"
  val cp_cg   = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "c{p.r}"      V 1.157    x "Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания"
  val ts_cool = & TEMPERATURE_K        "Т*{ox}"      V 600.0    x "Полная температура охлаждающего воздуха"
  val gm_cool_sb = & COEFFICIENT_REL    "γ{ox.тсв.са}" V 0.0      x "Относительный расход воздуха, поступающего на
охлаждение СА"
  val gm_cool_rb = & COEFFICIENT_REL    "γ{ox.тсв.рк}" V 0.0      x "Относительный расход воздуха, поступающего на
охлаждение РК"
  val cp_a     = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "c{p.в}"      V 1.005    x "Изобарная теплоёмкость воздуха"
  val gm_th    = & COEFFICIENT_REL      "γ|5.01"      V 1.0      0 "Относительный расход в 'горле' СА первой ступени"
  val ts_th    = & TEMPERATURE_K        "Т*|5.01"     V 1400.0   0 "Полная температура в 'горле' СА первой ступени"
  val p_0      = & PRESSURE_kPa         "p|0"         V 101.325  x "Давление атмосферного воздуха"
  val pi_na    = & PRESSURE_RATIO       "π{ср}"       V 1.25     0 "Располагаемая степень понижения давления в выходном
устройстве"
  val eff_m    = & EFFICIENCY_POWER     "η{м.св}"     V 1.0      0 "Коэффициент механических потерь"
  val pi       = & PRESSURE_RATIO       "π*{тсв}"     V 2.0      0 "Степень понижения давления в турбине"
  val eta      = & EFFICIENCY_ETA       "η*{тсв}"     V 0.89     0 "КПД турбины"
  val lw_t     = & ENERGY_kJ_SPEC_kg   "L{тсв}"     V 300.0    0 "Удельная работа турбины"
  val pwr_e_spc = & POWER_kw_SPEC_kg_s  "N{е.уд}"    V 300.0    0 "Удельная эффективная мощность двигателя"
  val gm_rb    = & COEFFICIENT_REL      "γ|5.09"     V 1.0      0 "Относительный расход в 'горле' РК последней ступени"
  val ts_rb    = & TEMPERATURE_K        "Т*|5.09"     V 1100.0   0 "Полная температура в 'горле' РК последней ступени"
  val gm_x     = & COEFFICIENT_REL      "γ|6"        V 1.0      0 "Относительный расход рабочего тела на выходе"
  val ts_x     = & TEMPERATURE_K        "Т*|6"        V 1100.0   0 "Полная температура на выходе"
  val ps_x     = & PRESSURE_kPa         "p*|6"        V 500.0    0 "Полное давление на выходе"
  //-----|-----|-----|-----|
  k_cg      := 1.33
  cp_cg     := 1.157
  cp_a      := 1.005
  gm_th     := gm_o + gm_cool_sb
  ts_th     := ( gm_o * cp_cg * ts_o + gm_cool_sb * cp_a * ts_cool ) / ( gm_th * cp_cg )
}
```

```
pi := ps_o / ( p_0 * pi_na )
lw_t := cp_cg * ts_th * ( 1.0 - 1.0 / power( pi , ( k_cg - 1.0 ) / k_cg ) ) * eta
pwr_e_spc := gm_th * lw_t * eff_m
gm_rb := gm_th
ts_rb := ts_th - lw_t / cp_cg
gm_x := gm_rb + gm_cool_rb
ts_x := ( gm_rb * cp_cg * ts_rb + gm_cool_rb * cp_a * ts_cool ) / ( gm_x * cp_cg )
ps_x := ps_o / pi
}
```

Модуль - Канал

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
γ_5	-	Относительный расход рабочего тела на входе
T_5^*	К	Полная температура на входе
p_5^*	кПа	Полное давление на входе
$\sigma_{\text{кан}}$	-	Кэффициент восстановления полного давления

Выходные параметры

- Относительный расход рабочего тела на выходе:

$$\gamma_6 = \gamma_5 \cdot$$

- Полная температура на выходе:

$$T_6^* = T_5^*, \text{ К}.$$

- Полное давление на выходе:

$$p_6^* = p_5^* \cdot \sigma_{\text{кан}}, \text{ кПа}.$$

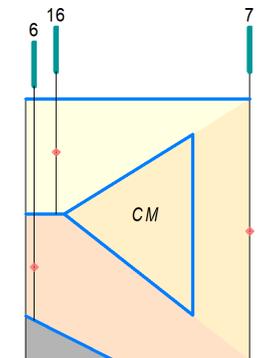
Код модуля

```
class E2S_51_Duct extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Duct # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Канал # канал"
  note    = "Учет потерь полного давления в канале проточной части."
  //-----|-----|-----|-----|
  val gm_o = & COEFFICIENT_REL      "γ|5"          V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе"
  val ts_o = & TEMPERATURE_K       "T*|5"      V 288.15   x "Полная температура на входе"
  val ps_o = & PRESSURE_kPa         "p*|5"      V 101.325  x "Полное давление на входе"
  val sigma = & EFFICIENCY_SIGMA    "σ{кан}"    V 1.0      0 "Коэффициент восстановления полного давления"
  val gm_x = & COEFFICIENT_REL      "γ|6"          V 1.0      0 "Относительный расход рабочего тела на выходе"
  val ts_x = & TEMPERATURE_K       "T*|6"      V 288.15   0 "Полная температура на выходе"
  val ps_x = & PRESSURE_kPa         "p*|6"      V 101.325  0 "Полное давление на выходе"
  //-----|-----|-----|-----|
  gm_x      := gm_o
  ts_x      := ts_o
  ps_x      := ps_o * sigma
}
```

Модуль - Камера смешения

Расчет параметров процесса смешения потоков в камере смешения.

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
γ_{16}	-	Относительный расход рабочего тела на входе в наружном контуре
T_{16}^*	К	Полная температура на входе в наружном контуре
p_{16}^*	кПа	Полное давление на входе в наружном контуре
γ_6	-	Относительный расход рабочего тела на входе во внутреннем контуре
T_6^*	К	Полная температура на входе во внутреннем контуре
p_6^*	кПа	Полное давление на входе во внутреннем контуре
$\sigma_{см}$	-	Коэффициент восстановления полного давления

Выходные параметры

- Изобарная теплоёмкость воздуха:

$$c_{p,a} = 1,005, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания:

$$c_{p,r} = 1,157, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Относительный расход рабочего тела на выходе:

$$\gamma_7 = \gamma_{16} + \gamma_6.$$

- Полная температура на выходе:

$$T_7^* = \frac{\gamma_{16} \cdot c_{p,a} \cdot T_{16}^* + \gamma_6 \cdot c_{p,r} \cdot T_6^*}{(\gamma_{16} + \gamma_6) \cdot c_{p,r}}, \text{ К}.$$

- Полное давление на выходе:

$$p_6^* = \sigma_{см} \cdot \frac{\gamma_{16} \cdot p_{16}^* + \gamma_6 \cdot p_6^*}{\gamma_{16} + \gamma_6}, \text{ кПа}.$$

Код модуля

```
class E2S_61_Mixer extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Mixer # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Камера смешения # кам-см"
  note    = "Расчет параметров процесса смешения потоков в камере смешения."
  //-----|-----|-----|-----|
  val cp_a      = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K      "c{p.в}"      V 1.005      x "Изобарная теплоёмкость воздуха"
  val gm_II_o   = & COEFFICIENT_REL           "γ|16"          V 0.5        x "Относительный расход рабочего тела на входе в
наружном контуре"
  val ts_II_o   = & TEMPERATURE_K            "T*|16"         V 350.0      x "Полная температура на входе в наружном контуре"
  val ps_II_o   = & PRESSURE_kPa             "p*|16"         V 150.0      x "Полное давление на входе в наружном контуре"
```

```

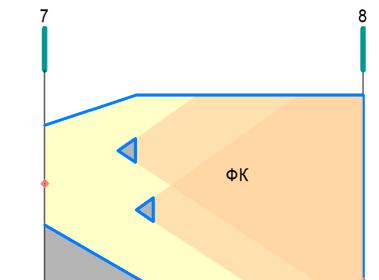
val cp_cg      = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K      "c{p.r}"      V 1.157      x "Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания"
val gm_I_o    = & COEFFICIENT_REL           "γ|6"         V 1.0         x "Относительный расход рабочего тела на входе во
внутреннем контуре"
val ts_I_o    = & TEMPERATURE_K            "T*|6"        V 1000.0     x "Полная температура на входе во внутреннем контуре"
val ps_I_o    = & PRESSURE_kPa              "p*|6"        V 150.0      x "Полное давление на входе во внутреннем контуре"
val sigma     = & EFFICIENCY_SIGMA         "σ{cm}"       V 0.99       0 "Коэффициент восстановления полного давления"
val gm_x      = & COEFFICIENT_REL           "γ|7"         V 1.0         0 "Относительный расход рабочего тела на выходе"
val ts_x      = & TEMPERATURE_K            "T*|7"        V 800.0      0 "Полная температура на выходе"
val ps_x      = & PRESSURE_kPa              "p*|7"        V 150.0      0 "Полное давление на выходе"
//-----|-----|-----|-----|
cp_a          := 1.005
cp_cg         := 1.157
gm_x          := gm_II_o + gm_I_o
ts_x          := ( gm_II_o * cp_a * ts_II_o + gm_I_o * cp_cg * ts_I_o ) / ( ( gm_II_o + gm_I_o ) * cp_cg )
ps_x          := sigma * ( gm_II_o * ps_II_o + gm_I_o * ps_I_o ) / ( gm_II_o + gm_I_o )
}

```

Модуль - Форсажная камера

Расчет параметров процесса подвода тепла в форсажной камере сгорания.

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
γ_7	-	Относительный расход рабочего тела на входе
T_7^*	К	Полная температура на входе
p_7^*	кПа	Полное давление на входе
$\sigma_{\text{фк}}$	-	Коэффициент восстановления полного давления
$\eta_{\text{г.ф}}$	-	Коэффициент полноты сгорания топлива
T_8^*	К	Полная температура на выходе

Выходные параметры

- Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания на выходе:

- Теплота сгорания топлива:

$$c_{p,r} = 1,157, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Относительный расход топлива:

$$H_u = 42900, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Относительный расход рабочего тела на выходе:

$$g_{\tau,\phi} = \frac{c_{p,r} \cdot (T_8^* - T_7^*)}{H_u \cdot \eta_{\tau,\phi}}.$$

- Полное давление на выходе:

$$\gamma_8 = \gamma_7 \cdot (1 + g_{\tau,\phi}).$$

$$p_8^* = p_7^* \cdot \sigma_{\phi_k}, \text{ кПа}.$$

Код модуля

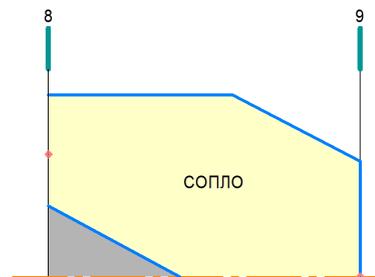
```
class E2S_65_Afterburner extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Afterburner # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Форсажная камера # фк"
  note    = "Расчет параметров процесса подвода тепла в форсажной камере сгорания."
  //-----|-----|-----|-----|
  val gm_o    = & COEFFICIENT_REL      "γ|7"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе"
  val ts_o    = & TEMPERATURE_K        "T*|7"     V 1000.0   x "Полная температура на входе"
  val ps_o    = & PRESSURE_kPa          "p*|7"     V 300.0    x "Полное давление на входе"
  val cp_cg   = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "c{p.r}"   V 1.157    x "Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания"
  val hu      = & ENERGY_kJ_SPEC_kg   "H{u}"     D 0        V 42900.0 x "Теплота сгорания топлива"
  val sigma   = & EFFICIENCY_SIGMA     "σ{фк}"    V 0.92     0 "Коэффициент восстановления полного давления"
  val eff     = & EFFICIENCY_ENERGY    "η{г.ф}"   V 0.96     0 "Коэффициент полноты сгорания топлива"
  val gf_rel  = & COEFFICIENT_REL      "g{т.ф}"   V 0.04     0 "Относительный расход топлива"
  val gm_x    = & COEFFICIENT_REL      "γ|8"      V 1.0      0 "Относительный расход рабочего тела на выходе"
  val ts_x    = & TEMPERATURE_K        "T*|8"     V 2000.0   0 "Полная температура на выходе"
  val ps_x    = & PRESSURE_kPa          "p*|8"     V 300.0    0 "Полное давление на выходе"
```

```
//-----|-----|-----|-----|
cp_cg      := 1.157
hu         := 42900.0
gf_rel     := cp_cg * ( ts_x - ts_o ) / ( hu * eff )
gm_x      := gm_o * ( 1.0 + gf_rel )
ps_x      := ps_o * sigma
}
```

Модуль - Сопло

Расчет параметров процесса расширения в сопле основного (внутреннего) контура.

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
γ_8	-	Относительный расход рабочего тела на входе
T_8^*	К	Полная температура на входе
p_8^*	кПа	Полное давление на входе
p_0	кПа	Давление атмосферного воздуха
ϕ_c	-	Коэффициент скорости

Выходные параметры

- Показатель изэнтропы продуктов сгорания:

$$k_r = 1,33.$$

- Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания:

$$c_{p,r} = 1,157, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Располагаемая степень понижения давления:

$$\pi_{cp} = \frac{p_8^*}{p_0}.$$

- Скорость истечения:

$$c_9 = \phi_c \cdot \sqrt{2000 \cdot c_{p,r} \cdot T_8^* \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_{cp}^{\frac{k_r-1}{k_r}}}\right)}, \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

- Статическая температура на выходе:

$$T_9 = T_8^* - \frac{c_9^2}{2000 \cdot c_{p,r}}, \text{ К}.$$

- Относительный расход рабочего тела на выходе:

$$\gamma_9 = \gamma_8.$$

Код модуля

```
class E2S_71_Nozzle extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Nozzle # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Сопло # сопло"
  note    = "Расчет параметров процесса расширения в сопле основного (внутреннего) контура."
  //-----|-----|-----|-----|
  val gm_o    = & COEFFICIENT_REL      "γ|8"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе"
  val ts_o    = & TEMPERATURE_K       "Т*|8"     V 800.0    x "Полная температура на входе"
  val ps_o    = & PRESSURE_kPa         "p*|8"     V 200.0    x "Полное давление на входе"
  val k_cg    = & COEFFICIENT          "k{r}"     V 1.33     x "Показатель изэнтропии продуктов сгорания"
  val cp_cg   = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "c{p.r}"   V 1.157    x "Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания"
```

```

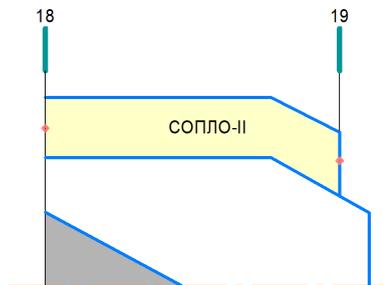
val p_0      = & PRESSURE_kPa      "p|0"      V 101.325    x "Давление атмосферного воздуха"
val pi_sr    = & PRESSURE_RATIO   "π{ср}"    V 2.0        0 "Располагаемая степень понижения давления"
val phi      = & EFFICIENCY_PHI   "φ{с}"     V 0.99       0 "Коэффициент скорости"
val gm_x     = & COEFFICIENT_REL   "γ|9"      V 1.0        0 "Относительный расход рабочего тела на выходе"
val t_x      = & TEMPERATURE_K    "T|9"      V 500.0     0 "Статическая температура на выходе"
val c_x      = & VELOCITY_m_s     "c|9"      V 350.0     0 "Скорость истечения"
//-----|-----|-----|-----|
k_cg         := 1.33
cp_cg        := 1.157
pi_sr        := ps_o / p_0
c_x          := phi * root2( 2000.0 * cp_cg * ts_o * ( 1.0 - 1.0 / power( pi_sr , ( k_cg - 1.0 ) / k_cg ) ) )
t_x          := ts_o - c_x * c_x / ( 2000.0 * cp_cg )
gm_x         := gm_o
}

```

Модуль - Сопло-II

Расчет параметров процесса расширения воздуха в сопле наружного контура.

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
γ_{18}	-	Относительный расход рабочего тела на входе
T_{18}^*	К	Полная температура на входе
p_{18}^*	кПа	Полное давление на входе
p_0	кПа	Давление атмосферного воздуха
$\phi_{с-II}$	-	Коэффициент скорости

Выходные параметры

- Показатель изоэнтропы воздуха:

$$k_{\text{в}} = 1,40.$$

- Изобарная теплоёмкость воздуха:

$$c_{p,\text{в}} = 1,005, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Располагаемая степень понижения давления:

$$\pi_{\text{срII}} = \frac{p_{18}^*}{p_0}.$$

- Скорость истечения:

$$c_{19} = \phi_{\text{сII}} \cdot \sqrt{2000 \cdot c_{p,\text{в}} \cdot T_{18}^* \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_{\text{срII}}^{\frac{k_{\text{в}}-1}{k_{\text{в}}}}}\right)}, \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

- Статическая температура на выходе:

$$T_{19} = T_{18}^* - \frac{c_{19}^2}{2000 \cdot c_{p,\text{в}}}, \text{ К}.$$

- Относительный расход рабочего тела на выходе:

$$\gamma_{19} = \gamma_{18}.$$

Код модуля

```
class E2S_72_Nozzle_II extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Nozzle-II # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Сопло II # сопло-II"
  note    = "Расчет параметров процесса расширения воздуха в сопле наружного контура."
  //-----|-----|-----|-----|
  val gm_o    = & COEFFICIENT_REL      "γ|18"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе"
  val ts_o    = & TEMPERATURE_K       "T*|18"     V 350.0    x "Полная температура на входе"
  val ps_o    = & PRESSURE_kPa         "p*|18"     V 150.0    x "Полное давление на входе"
  val k_a     = & COEFFICIENT          "k{в}"      V 1.40     x "Показатель изоэнтропии воздуха"
  val cp_a    = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "c{p.в}"    V 1.005    x "Изобарная теплоёмкость воздуха"
```

```

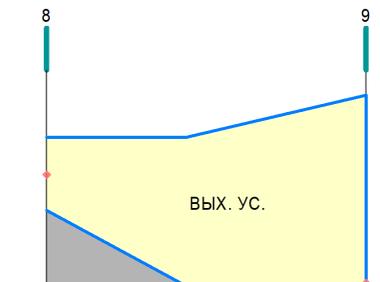
val p_0      = & PRESSURE_kPa      "p|0"      V 101.325  x "Давление атмосферного воздуха"
val pi_sr   = & PRESSURE_RATIO    "π{срII}"  V 1.5      0 "Располагаемая степень понижения давления"
val phi     = & EFFICIENCY_PHI    "φ{сII}"   V 0.99     0 "Коэффициент скорости"
val gm_x   = & COEFFICIENT_REL    "γ|19"     V 1.0      0 "Относительный расход рабочего тела на выходе"
val t_x    = & TEMPERATURE_K     "T|19"     V 300.0    0 "Статическая температура на выходе"
val c_x    = & VELOCITY_m_s      "c|19"     V 150.0    0 "Скорость истечения"
//-----|-----|-----|-----|
k_a        := 1.4
cp_a       := 1.005
pi_sr      := ps_o / p_0
c_x        := phi * root2( 2000.0 * cp_a * ts_o * ( 1.0 - 1.0 / power( pi_sr , ( k_a - 1.0 ) / k_a ) ) )
t_x        := ts_o - c_x * c_x / ( 2000.0 * cp_a )
gm_x       := gm_o
}

```

Модуль - Выходное устройство

Расчет параметров процесса в диффузном выходном устройстве.

Расчетная схема



Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
γ_8	-	Относительный расход рабочего тела на входе
T_8^*	К	Полная температура на входе
p_8^*	кПа	Полное давление на входе
π_{cp}	-	Располагаемая степень понижения давления
ϕ_c	-	Коэффициент скорости

Выходные параметры

- Показатель изоэнтропы продуктов сгорания:

$$k_r = 1,33.$$

- Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания:

$$c_{p,r} = 1,157, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

- Скорость истечения:

$$c_9 = \phi_c \cdot \sqrt{2000 \cdot c_{p,r} \cdot T_8^* \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_{\text{ср}}^{\frac{k_r-1}{k_r}}}\right)}, \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

- Статическая температура на выходе:

$$T_9 = T_8^* - \frac{c_9^2}{2000 \cdot c_{p,r}}, \text{К}.$$

- Относительный расход рабочего тела на выходе:

$$\gamma_9 = \gamma_8.$$

Код модуля

```
class E2S_73_Outlet extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Outlet # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Выходное устройство # вых-ус"
  note    = "Расчет параметров процесса в диффузорном выходном устройстве."
  //-----|-----|-----|-----|
  val gm_o    = & COEFFICIENT_REL      "γ|8"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе"
  val ts_o    = & TEMPERATURE_K       "Т*|8"     V 700.0    x "Полная температура на входе"
  val ps_o    = & PRESSURE_kPa         "p*|8"     V 105.0    x "Полное давление на входе"
  val k_cg    = & COEFFICIENT         "k{r}"     V 1.33     x "Показатель изоэнтропы продуктов сгорания"
  val cp_cg   = & ENERGY_kJ_SPEC_kg_K "c{p,r}"   V 1.157    x "Изобарная теплоёмкость продуктов сгорания"
  val pi_sr   = & PRESSURE_RATIO       "π{ср}"    V 1.05     0 "Располагаемая степень понижения давления"
  val phi     = & EFFICIENCY_PHI       "φ{с}"     V 0.75     0 "Кэффициент скорости"
  val gm_x    = & COEFFICIENT_REL      "γ|9"      V 1.0      0 "Относительный расход рабочего тела на выходе"
  val t_x     = & TEMPERATURE_K       "T|9"      V 600.0    0 "Статическая температура на выходе"
```

```

val c_x      = & VELOCITY_m_s      "c|9"      V 50.0      0 "Скорость истечения"
//-----|-----|-----|-----|
k_cg        := 1.33
cp_cg       := 1.157
c_x         := phi * root2( 2000.0 * cp_cg * ts_o * ( 1.0 - 1.0 / power( pi_sr , ( k_cg - 1.0 ) / k_cg ) ) )
t_x         := ts_o - c_x * c_x / ( 2000.0 * cp_cg )
gm_x        := gm_o
}

```

Модуль - Показатели ТРД

Расчет показателей рабочего процесса ТРД.

Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
$V_{п}$	$\frac{м}{с}$	Скорость полета
γ_9	-	Относительный расход рабочего тела на выходе из сопла
c_9	$\frac{м}{с}$	Скорость истечения из сопла
$\gamma_{3.1}$	-	Относительный расход рабочего тела на входе в камеру сгорания
g_T	-	Относительный расход топлива
P	кН	Тяга двигателя

Выходные параметры

- Удельная тяга двигателя:

$$P_{уд} = 0,001 \cdot (\gamma_9 \cdot c_9 - V_{п}), \frac{кН \cdot с}{кг}.$$

- Расход воздуха через двигатель:

$$G_{в} = \frac{P}{P_{уд}}, \frac{кг}{с}.$$

- Часовой расход топлива:

$$G_{т.ч} = 3600 \cdot g_T \cdot \gamma_{3.1} \cdot G_{в}, \frac{кг}{ч}.$$

- Удельный расход топлива:

$$C_{уд} = \frac{G_{т.ч}}{P}, \frac{\text{кг}}{\text{кН} \cdot \text{ч}}.$$

Код модуля

```

class E2S_81_Specs_TJ extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Спецс-TJ # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Показатели ТРД # показатели"
  note    = "Расчет показателей рабочего процесса ТРД."
  //-----|-----|-----|-----|
  val v    = & VELOCITY_m_s      "V{n}"      V 0.0      x "Скорость полета"
  val gm_9 = & COEFFICIENT_REL   "γ|9"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на выходе из
сопла"
  val c_9  = & VELOCITY_m_s      "c|9"      V 350.0    x "Скорость истечения из сопла"
  val gm_31 = & COEFFICIENT_REL  "γ|3.1"    V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе в камеру
сгорания"
  val gf_rel = & COEFFICIENT_REL "g{т}"      V 0.01     x "Относительный расход топлива"
  val frc    = & FORCE_kN         "P"        V 100.0    0 "Тяга двигателя"
  val frc_spc = & FORCE_kN_SPEC_kg_s "P{уд}"    V 1.0      0 "Удельная тяга двигателя"
  val gr     = & MASS_kg_RATE_s  "G{в}"      V 100.0    0 "Расход воздуха через двигатель"
  val gf_h   = & MASS_kg_RATE_h  "G{т.ч}"    V 5000.0   0 "Часовой расход топлива"
  val sfc    = & MASS_kg_RATE_h_SPEC_kN "C{уд}"    V 80.0     0 "Удельный расход топлива"
  //-----|-----|-----|-----|
  frc_spc    := 0.001 * ( gm_9 * c_9 - v )
  gr         := frc / frc_spc
  gf_h       := 3600.0 * gf_rel * gm_31 * gr
  sfc        := gf_h / frc
}

```

Модуль - Показатели ТРДД

Расчет показателей рабочего процесса ТРДД.

Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
V_{II}	$\frac{м}{с}$	Скорость полета
γ_{19}	-	Относительный расход рабочего тела на выходе из сопла наружного контура
c_{19}	$\frac{м}{с}$	Скорость истечения из сопла наружного контура
γ_9	-	Относительный расход рабочего тела на выходе из сопла внутреннего контура
c_9	$\frac{м}{с}$	Скорость истечения из сопла внутреннего контура
$\gamma_{3.1}$	-	Относительный расход рабочего тела на входе в камеру сгорания
g_T	-	Относительный расход топлива
P	кН	Тяга двигателя

Выходные параметры

- Удельная тяга двигателя:

$$P_{уд} = 0,001 \cdot (\gamma_{19} \cdot c_{19} + \gamma_9 \cdot c_9 - V_{II}), \frac{кН \cdot с}{кг}.$$

- Расход воздуха через двигатель:

$$G_B = \frac{P}{P_{уд}}, \frac{кг}{с}.$$

- Часовой расход топлива:

$$G_{т.ч} = 3600 \cdot g_T \cdot \gamma_{3.1} \cdot G_B, \frac{кг}{ч}.$$

- Удельный расход топлива:

$$C_{\text{уд}} = \frac{G_{\text{т.ч}}}{P}, \frac{\text{кг}}{\text{кН} \cdot \text{ч}}.$$

Код модуля

```
class E2S_82_Specs_TF extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Specs-TF # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Показатели ТРДД # показатели"
  note    = "Расчет показателей рабочего процесса ТРДД."
  //-----|-----|-----|-----|
  val v    = & VELOCITY_m_s      "V{n}"      V 0.0      x "Скорость полета"
  val gm_19 = & COEFFICIENT_REL  "γ|19"     V 0.5      x "Относительный расход рабочего тела на выходе из
сопла наружного контура"
  val c_19  = & VELOCITY_m_s      "c|19"     V 150.0    x "Скорость истечения из сопла наружного контура"
  val gm_9   = & COEFFICIENT_REL  "γ|9"      V 0.5      x "Относительный расход рабочего тела на выходе из
сопла внутреннего контура"
  val c_9    = & VELOCITY_m_s      "c|9"      V 350.0    x "Скорость истечения из сопла внутреннего контура"
  val gm_31  = & COEFFICIENT_REL  "γ|3.1"    V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе в камеру
сгорания"
  val gf_rel = & COEFFICIENT_REL  "g{т}"      V 0.01     x "Относительный расход топлива"
  val frc    = & FORCE_kN          "P"        V 100.0    0 "Тяга двигателя"
  val frc_spc = & FORCE_kN_SPEC_kg_s "P{уд}"    V 1.0      0 "Удельная тяга двигателя"
  val gr     = & MASS_kg_RATE_s    "G{в}"      V 100.0    0 "Расход воздуха через двигатель"
  val gf_h   = & MASS_kg_RATE_h    "G{т.ч}"    V 5000.0   0 "Часовой расход топлива"
  val sfc    = & MASS_kg_RATE_h_SPEC_kN "C{уд}"    V 50.0     0 "Удельный расход топлива"
  //-----|-----|-----|-----|
  frc_spc    := 0.001 * ( gm_19 * c_19 + gm_9 * c_9 - v )
  gr         := frc / frc_spc
  gf_h       := 3600.0 * gf_rel * gm_31 * gr
  sfc        := gf_h / frc
}
```

Модуль - Показатели ТРДДсм

Расчет показателей рабочего процесса ТРДДсм.

Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
$V_{п}$	$\frac{м}{с}$	Скорость полета
γ_9	-	Относительный расход рабочего тела на выходе из сопла
c_9	$\frac{м}{с}$	Скорость истечения из сопла
$\gamma_{3.1}$	-	Относительный расход рабочего тела на входе в камеру сгорания
g_T	-	Относительный расход топлива
P	кН	Тяга двигателя

Выходные параметры

- Удельная тяга двигателя:

$$P_{уд} = 0,001 \cdot (\gamma_9 \cdot c_9 - V_{п}), \frac{кН \cdot с}{кг}.$$

- Расход воздуха через двигатель:

$$G_{в} = \frac{P}{P_{уд}}, \frac{кг}{с}.$$

- Часовой расход топлива:

$$G_{т.ч} = 3600 \cdot g_T \cdot \gamma_{3.1} \cdot G_{в}, \frac{кг}{ч}.$$

- Удельный расход топлива:

$$C_{уд} = \frac{G_{т.ч}}{P}, \frac{\text{кг}}{\text{кН} \cdot \text{ч}}.$$

Код модуля

```

class E2S_83_Specs_TFm extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Specs-TFm # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Показатели ТРДДсм # показатели"
  note    = "Расчет показателей рабочего процесса ТРДДсм."
  //-----|-----|-----|-----|
  val v    = & VELOCITY_m_s      "V{n}"      V 0.0      x "Скорость полета"
  val gm_9 = & COEFFICIENT_REL    "γ|9"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на выходе из
сопла"
  val c_9  = & VELOCITY_m_s      "c|9"      V 350.0    x "Скорость истечения из сопла"
  val gm_31 = & COEFFICIENT_REL  "γ|3.1"    V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе в камеру
сгорания"
  val gf_rel = & COEFFICIENT_REL  "g{т}"      V 0.01     x "Относительный расход топлива"
  val frc    = & FORCE_kN          "P"          V 100.0    0 "Тяга двигателя"
  val frc_spc = & FORCE_kN_SPEC_kg_s "P{уд}"      V 1.0      0 "Удельная тяга двигателя"
  val gr     = & MASS_kg_RATE_s    "G{в}"      V 100.0    0 "Расход воздуха через двигатель"
  val gf_h   = & MASS_kg_RATE_h    "G{т.ч}"    V 5000.0   0 "Часовой расход топлива"
  val sfc    = & MASS_kg_RATE_h_SPEC_kN "C{уд}"      V 50.0     0 "Удельный расход топлива"
  //-----|-----|-----|-----|
  frc_spc    := 0.001 * ( gm_9 * c_9 - v )
  gr         := frc / frc_spc
  gf_h       := 3600.0 * gf_rel * gm_31 * gr
  sfc        := gf_h / frc
}

```

Модуль - Показатели ТРДФ и ТРДДФсм

Расчет показателей рабочего процесса ТРДФ и ТРДДФсм.

Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
V_{II}	$\frac{м}{с}$	Скорость полета
γ_9	-	Относительный расход рабочего тела на выходе из сопла
c_9	$\frac{м}{с}$	Скорость истечения из сопла
$\gamma_{3.1}$	-	Относительный расход рабочего тела на входе в основную камеру сгорания
g_T	-	Относительный расход топлива в основной камере сгорания
γ_7	-	Относительный расход рабочего тела на входе в форсажную камеру сгорания
$g_{T.ф}$	-	Относительный расход топлива в форсажной камере сгорания
P	кН	Тяга двигателя

Выходные параметры

- Удельная тяга двигателя:

$$P_{уд} = 0,001 \cdot (\gamma_9 \cdot c_9 - V_{II}), \frac{кН \cdot с}{кг}.$$

- Расход воздуха через двигатель:

$$G_B = \frac{P}{P_{уд}}, \frac{кг}{с}.$$

- Часовой расход топлива в основной камере сгорания:

$$G_{T.кс.ч} = 3600 \cdot g_T \cdot \gamma_{3.1} \cdot G_B, \frac{кг}{ч}.$$

- Часовой расход топлива в форсажной камере сгорания:

$$G_{т.фк.ч} = 3600 \cdot g_{т.ф} \cdot \gamma_{т} \cdot G_{в}, \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

- Суммарный часовой расход топлива:

$$G_{т.ч} = G_{т.кс.ч} + G_{т.фк.ч}, \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

- Удельный расход топлива:

$$C_{уд} = \frac{G_{т.ч}}{P}, \frac{\text{кг}}{\text{кН} \cdot \text{ч}}.$$

Код модуля

```
class E2S_85_Specs_TJab extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Specs-TJab # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Показатели ТРДФ и ТРДДФсм # показатели"
  note    = "Расчет показателей рабочего процесса ТРДФ и ТРДДФсм."
  //-----|-----|-----|-----|
  val v    = & VELOCITY_m_s      "V{n}"      V 0.0      x "Скорость полета"
  val gm_9 = & COEFFICIENT_REL   "γ|9"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на выходе из
сопла"
  val c_9  = & VELOCITY_m_s      "c|9"      V 350.0    x "Скорость истечения из сопла"
  val gm_31 = & COEFFICIENT_REL  "γ|3.1"    V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе в
основную камеру сгорания"
  val gf_rel_b = & COEFFICIENT_REL "g{т}"      V 0.01     x "Относительный расход топлива в основной камере
сгорания"
  val gm_7  = & COEFFICIENT_REL   "γ|7"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе в
форсажную камеру сгорания"
  val gf_rel_ab = & COEFFICIENT_REL "g{т.ф}"    V 0.01     x "Относительный расход топлива в форсажной камере
сгорания"
  val frc   = & FORCE_kN           "P"        V 100.0    0 "Тяга двигателя"
  val frc_spc = & FORCE_kN_SPEC_kg_s "P{уд}"    V 1.0      0 "Удельная тяга двигателя"
  val gr     = & MASS_kg_RATE_s    "G{в}"      V 100.0    0 "Расход воздуха через двигатель"
  val gf_h_b = & MASS_kg_RATE_h    "G{т.кс.ч}" V 2000.0   0 "Часовой расход топлива в основной камере сгорания"
```

```

val gf_h_ab   = & MASS_kg_RATE_h      "G{т.фк.ч}"    V 5000.0  0 "Часовой расход топлива в форсажной камере сгорания"
val gf_h     = & MASS_kg_RATE_h      "G{т.ч}"      V 7000.0  0 "Суммарный часовой расход топлива"
val sfc      = & MASS_kg_RATE_h_SPEC_kN "C{уд}"      V 200.0   0 "Удельный расход топлива"
//-----|-----|-----|
frc_spc      := 0.001 * ( gm_9 * c_9 - v )
gr           := frc / frc_spc
gf_h_b      := 3600.0 * gf_rel_b * gm_31 * gr
gf_h_ab     := 3600.0 * gf_rel_ab * gm_7 * gr
gf_h        := gf_h_b + gf_h_ab
sfc          := gf_h / frc
}

```

Модуль - Показатели ТВД

Расчет показателей рабочего процесса ТВД.

Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
V_{II}	$\frac{м}{с}$	Скорость полета
γ_9	-	Относительный расход рабочего тела на выходе из сопла
c_9	$\frac{м}{с}$	Скорость истечения из сопла
$\gamma_{3.1}$	-	Относительный расход рабочего тела на входе в камеру сгорания
g_T	-	Относительный расход топлива
$N_{e,уд}^r$	$\frac{кВт \cdot с}{кг}$	Удельная эффективная мощность двигателя
$\left(\frac{V_{II}}{\eta_B}\right)$	$\frac{кВт}{кН}$	Величина отношения скорости полета к КПД винта (коэффициент преобразования тяги в мощность)
$\eta_{ред}$	-	Коэффициент потерь мощности в редукторе
N_3	кВт	Эквивалентная мощность двигателя

Выходные параметры

- Удельная тяга двигателя:

$$P_{уд} = 0,001 \cdot (\gamma_9 \cdot c_9 - V_{II}), \frac{кН \cdot с}{кг}.$$

- Удельная эквивалентная мощность двигателя:

$$N_{3,уд} = N_{e,уд} \cdot \eta_{ред} + P_{уд} \cdot \left(\frac{V_{II}}{\eta_B}\right), \frac{кВт \cdot с}{кг}.$$

- Расход воздуха через двигатель:

$$G_B = \frac{N_3}{N_{3,уд}}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

- Часовой расход топлива:

$$G_{Т,ч} = 3600 \cdot g_T \cdot \gamma_{3.1} \cdot G_B, \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

- Эффективная мощность двигателя:

$$N_e = N_{e,уд} \cdot G_B, \text{кВт}.$$

- Мощность на валу винта:

$$N_B = N_e \cdot \eta_{ред}, \text{кВт}.$$

- Эффективный удельный расход топлива:

$$C_e = \frac{G_{Т,ч}}{N_e}, \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$

- Эквивалентный удельный расход топлива:

$$C_3 = \frac{G_{Т,ч}}{N_3}, \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$

Код модуля

```
class E2S_87_Specs_TPr extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Specs-TPr # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Показатели ТВД # показатели"
  note    = "Расчет показателей рабочего процесса ТВД."
  //-----|-----|-----|-----|
  val v    = & VELOCITY_m_s      "V{n}"      V 0.0      x "Скорость полета"
  val gm_9 = & COEFFICIENT_REL    "γ|9"      V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на выходе из сопла"
  val c_9  = & VELOCITY_m_s      "c|9"      V 350.0    x "Скорость истечения из сопла"
  val gm_31 = & COEFFICIENT_REL  "γ|3.1"    V 1.0      x "Относительный расход рабочего тела на входе в камеру сгорания"
```

```

val gf_rel      = & COEFFICIENT_REL      "g{т}"      V 0.01      x "Относительный расход топлива"
val frc_spc     = & FORCE_kN_SPEC_kg_s    "P{уд}"     V 1.0       0 "Удельная реактивная тяга двигателя"
val pwr_e_spc   = & POWER_kW_SPEC_kg_s   "N{е.уд}"   V 300.0     0 "Удельная эффективная мощность двигателя"
val pwr_e       = & POWER_kW             "N{е}"      V 1000.0    0 "Эффективная мощность двигателя"
val k_pf        = & VELOCITY_m_s         "(V{n}/η{в})" V 68.2      0 "Величина отношения скорости полета к КПД винта
(коэффициент преобразования тяги в мощность)"
val eta_gear    = & EFFICIENCY_POWER     "η{ред}"    V 0.98      0 "Коэффициент потерь мощности в редукторе"
val pwr_pr      = & POWER_kW             "N{в}"      V 1000.0    0 "Мощность на валу винта"
val pwr_eqv_spc = & POWER_kW_SPEC_kg_s   "N{э.уд}"   V 0.2       0 "Удельная эквивалентная мощность двигателя"
val pwr_eqv     = & POWER_kW             "N{э}"      V 1000.0    0 "Эквивалентная мощность двигателя"
val gr          = & MASS_kg_RATE_s       "G{в}"      V 100.0     0 "Расход воздуха через двигатель"
val gf_h        = & MASS_kg_RATE_h       "G{т.ч}"    V 200.0     0 "Часовой расход топлива"
val sfc_e       = & MASS_kg_RATE_h_SPEC_kW "C{е}"      V 0.20      0 "Эффективный удельный расход топлива"
val sfc_eqv     = & MASS_kg_RATE_h_SPEC_kW "C{э}"      V 0.20      0 "Эквивалентный удельный расход топлива"
//-----|-----|-----|-----|
frc_spc       := 0.001 * ( gm_9 * c_9 - v )
pwr_eqv_spc   := pwr_e_spc * eta_gear + frc_spc * k_pf
gr            := pwr_eqv / pwr_eqv_spc
gf_h          := 3600.0 * gf_rel * gm_31 * gr
pwr_e         := pwr_e_spc * gr
pwr_pr        := pwr_e * eta_gear
sfc_e         := gf_h / pwr_e
sfc_eqv       := gf_h / pwr_eqv
}

```

Модуль - Показатели ГТД СТ

Расчет показателей рабочего процесса ГТД СТ.

Входные параметры

Обозначение	Размерность	Описание
H_u	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Теплота сгорания топлива
$\gamma_{з.1}$	-	Относительный расход рабочего тела на входе в камеру сгорания
g_T	-	Относительный расход топлива
$N_{e,уд}$	$\frac{\text{кВт}\cdot\text{с}}{\text{кг}}$	Удельная эффективная мощность двигателя
N_e	кВт	Эффективная мощность двигателя

Выходные параметры

- Расход воздуха через двигатель:

$$G_v = \frac{N_e}{N_{e,уд}}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

- Часовой расход топлива:

$$G_{T,ч} = 3600 \cdot g_T \cdot \gamma_{з.1} \cdot G_v, \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

- Эффективный удельный расход топлива:

$$C_e = \frac{G_{T,ч}}{N_e}, \frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}.$$

- Эффективный КПД двигателя:

$$\eta_e = \frac{3600 \cdot N_e}{G_{T,ч} \cdot H_u}.$$

Код модуля

```
class E2S_88_Specs_TSh extends tau.astra.AstraModule {
  id      = "E2S Specs-TSh # 2.5 # Упрощенный расчет ГТД"
  label   = "Показатели ГТД СТ # показатели"
  note    = "Расчет показателей рабочего процесса ГТД СТ."
  //-----|-----|-----|-----|
  val hu   = & ENERGY_kJ_SPEC_kg      "H{u}"      D 0 V 42900d    x "Теплота сгорания топлива"
  val gm_31 = & COEFFICIENT_REL         "γ|3.1"      V 1.0        x "Относительный расход рабочего тела на входе в камеру сгорания"
  val gf_rel = & COEFFICIENT_REL        "g{т}"      V 0.01       x "Относительный расход топлива"
  val pwr_e_spc = & POWER_kw_SPEC_kg_s  "N{е.уд}"    V 300.0      0 "Удельная эффективная мощность двигателя"
  val pwr_e   = & POWER_kw              "N{е}"      V 1000.0     0 "Эффективная мощность двигателя"
  val gr      = & MASS_kg_RATE_s         "G{в}"      V 100.0      0 "Расход воздуха через двигатель"
  val gf_h    = & MASS_kg_RATE_h        "G{т.ч}"    V 200.0      0 "Часовой расход топлива"
  val sfc_e   = & MASS_kg_RATE_h_SPEC_kw "C{е}"      V 0.20       0 "Эффективный удельный расход топлива"
  val eff_e   = & EFFICIENCY_ENERGY     "η{е}"      V 0.30       0 "Эффективный КПД двигателя"
  //-----|-----|-----|-----|
  gr      := pwr_e / pwr_e_spc
  gf_h    := 3600.0 * gf_rel * gm_31 * gr
  sfc_e   := gf_h / pwr_e
  eff_e   := 3600.0 * pwr_e / ( gf_h * hu )
}
```

Примеры расчетных схем ГТД

Расчетная схема трехвального ТРДД

