

**А.Н. ЖУКОВ**

**ДВИГАТЕЛИ СВЕРХЗВУКОВОЙ АВИАЦИИ:  
ПОДТИПЫ С МЕХАНИЗМАМИ ИЗМЕНЕНИЯ  
СОСТОЯНИЯ ПОТОКА ПЕРЕД КОМПРЕССОРОМ**

*Исследуется проблема совершенствования сверхзвукового авиадвигателя коррекциями, расширяющими возможности автоматического регулирования. В процедурах сопоставлений с прототипом показывается высокий уровень перспектив практических разработок модификаций.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Термином заголовка «...механизмы изменения состояния потока перед компрессором» воздушно-реактивного двигателя (ВРД) обозначены устройства исполнения процессов без подвода тепловой энергии топлива. Корректируется подтип «турбореактивный двигатель (ТРД) с форсажной камерой сгорания (ТРДФ) с неизменными на траектории площадями протока газа в турбокомпрессоре».

Исходная позиция формирований, исследований:

- Проектная скорость летательного аппарата (ЛА) больше средней сверхзвуковой скорости.
- Основа обеспечения взлета – мощность силовой установки из идентичных образцов ВРД.
- Аэродинамическое сопротивление ЛА максимально в доминантной точке проекта. Желателен образец ТРДФ, функционирующий оптимально именно в этих условиях.
- Локально-оптимальный представитель ТРДФ в доминантной точке – это образец, который
  - 1) по критериям удельной тяги, импульсу тяги по тепловой энергии - функционирует оптимально;
  - 2) имеет проектную скорость потока на входе в компрессор как можно более близкую к единице, цель - уменьшение габаритов, веса конструкции и составляющей сопротивления ВРД в сопротивлении ЛА;
  - 3) проектное число оборотов ротора равно расчетной максимальной величине.
- Оптимальный в доминантной точке прототип вынужденно регулируется законом неизменности *приведенного* числа оборотов ротора во всем проектном диапазоне по *температуре торможения набегающего потока*. Следствия: в текущих точках диапазона расход воздуха – максимальный; температура газов в турбокомпрессоре уменьшается во столько раз, во сколько раз уменьшается температура торможения набегающего воздушного потока; уменьшаются значения и тяги, и импульса тяги по тепловой энергии топлива. В таком варианте маршевая силовая установка не может обеспечить взлет, по современным стандартам уровень экологии окрестности аэродрома становится неприемлемым.
- Переход к регулированию законом равенства температуры газа перед турбиной максимальному значению в окрестности доминантной точки позволяет обеспечить взлет. Однако в доминантной точке расход воздуха, абсолютная тяга у ТРДФ с таким законом значительно меньше, чем у локально-оптимального образца. Регулирование неизменностью температуры газа перед турбиной – негативный фактор эффективности продвижения ЛА с проектной скоростью.

- В формальных оценках сферы теоретико-эвристических формирований диапазон по температуре торможения набегающего потока в фиксированном слое атмосферы - аппроксимация допустимых состояний функционирования ЛА, взлет аппроксимирует точка с нулевой скоростью движения. Структуры формируются без учета ограничений, налагаемых на состояния потока воздухозаборником.

Следует подчеркнуть: система автоматического регулирования турбокомпрессора *необходимо корректируется или перестановкой, или вводом еще одного датчика температуры*, по значениям которой изменяется расход топлива в основной камере сгорания - температура торможения потока определяется непосредственно перед входом в компрессор.

## **1. Подтип с охлаждением потока перед компрессором испарением жидкости**

### **1.1. Предварительные замечания**

Впрыск жидкости перед компрессором, в компрессоре – воды, смеси воды с металлом, ... - известный способ интенсификации тяги ТРД. В практике первых этапов совершенствования конструкций ТРД проблема достижения большой сверхзвуковой скорости ЛА с разновидностями исключительно компрессорного ВРД не рассматривалась. Тогда подход к применению впрыска заключался в следующем: при заданной степени повышения давления воздуха уменьшить расход энергии компрессора. Исследования показали:

в цикле ТРД с промежуточными охлаждениями потока испарением жидкости при сжатии требуемая работа компрессора меньше, чем в обычном цикле;

при неизменности степени повышения давления и фиксированной температуре газа перед турбиной расход тепловой энергии топлива увеличивается, но он увеличивается в большей степени, чем уменьшается мощность компрессора;

тяги увеличивается, но увеличение весьма ограничено;

охлаждение испарением негативно в аспекте эффективности использования энергии топлива;

охлаждение испарением негативно в аспекте увеличения массы ЛА за счет расходуемой в полете массы охлаждающей жидкости.

Возврат к возможностям совершенствования ВРД охлаждением в нем потока испарением жидкости стимулируют следующие обстоятельства.

1. Существует подмножество расчетных скоростей, при которых конкурентоспособными становятся комбинированные силовые установки, например, установка, состоящая из ТРДФ и ПВРД (прямоточного ВРД).
2. Первая причина неэффективности ТРДФ как двигателя, призванного быть эффективным в расчетной точке функционирования ЛА, - существенное ограничение величины подводимой тепловой энергии: большая температура торможения набегающего потока и увеличение ее при поджатии в компрессоре с одной стороны и предельно допустимая температура газа перед турбиной с другой стороны.
3. Вторая причина неэффективности ТРДФ – в компрессоре, сформированном по условию оптимального функционирования в доминантной точке, степень повышения давления невелика, налагаемые традиционным регулированием ограничения существенны и он не может обеспечить взлет.
4. В точке взлета ЛА с комбинированной силовой установкой ПВРД – это дополнительный вес, усложняющий обеспечение взлета. В точке функционирования со значительной сверхзвуковой скоростью вклад ТРДФ в тягу силовой установки мал, его наличие усложняет проблему продвижения ЛА с проектной скоростью. Очевидно, желательны такие модификации ТРДФ, которые позволили бы исключить ПВРД из силовой установки.

5. Существует подмножество значений высоты, скорости полета, при которых возможно охлаждение потока в воздухозаборнике испарением жидкости.
6. Охлаждение потока перед компрессором позволит увеличить расход тепловой энергии в напряженных точках функционирования, несколько увеличить степень повышения давления газа в компрессоре в точке взлета.
7. Пусть применена программа регулирования с традиционным измерением температуры потока, охлаждение не влияет на расход воздуха. Выходной импульс модификации ТРДФ несколько увеличится за счет расхода массы жидкости и обусловленного охлаждением увеличения расхода массы топлива.
8. При большой сверхзвуковой скорости разность между выходным, входным импульсом прототипа невелика, увеличение тяги модификации только истечением массы ЛА будет весьма ощутимым. Следовательно, при некоторых условиях замена ПВРД массой жидкости позитивна.
9. Можно ожидать: при рациональных ограничениях расхода испаряемой жидкости, регулировании турбокомпрессора по температуре потока непосредственно перед компрессором область применения подтипов ТРДФ расширится.

## 1.2. Модель функционирования, оптимизация

### в доминантной точке, сравнения

Принимаются обозначения: ТРДФИ – ТРДФ с испарительной камерой 1 (рис. 1) перед компрессором,  $R, E_i, V_i, T_i, B_i, F_i, p_i, q_i, c_p$  – соответственно тяга, расход тепловой энергии топлива, скорость, абсолютная температура, расход газа, площадь протока, давление, относительная плотность тока, удельная теплоемкость газа при постоянном давлении,

$i$  – индекс сечения потока,

$B, X, K, \Gamma, T, \Phi, C$  – индексы торможения потока,

$H, x, z, \phi, C$  – индексы состояний потоков в движении,

$x$  – на входе в компрессор,  $z$  – на входе в турбину,  $\phi$

– критического сечения в сопле.

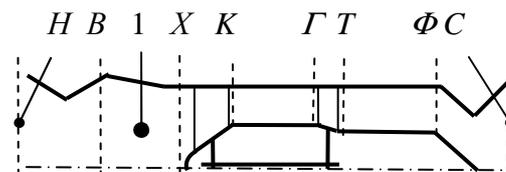


Рис. 1. Схема ТРДФИ

Основные положения моделей сферы теоретико-эвристических формирований структур дополняются условиями: *вся* введенная в поток жидкость испаряется до сечения  $X$ ; процесс испарения – изобарный; расход жидкости пренебрежимо мал по сравнению с расходом воздуха. Основные соотношения принимают вид

$$B_i = B_H, \quad E = E_\Gamma + E_\Phi = c_p B_H (T_\Gamma - T_K + T_\Phi - T_T),$$

$$R = B_H (V_C - V_H) = B_H \{ [2c_p (T_\Phi - T_C)]^{1/2} - [2c_p (T_B - T_H)]^{1/2} \},$$

$$T_K - T_X = T_\Gamma - T_T,$$

$$\oint \delta E/T = 0 \Rightarrow (T_B/T_H)(T_K/T_X) = (T_\Gamma/T_T)(T_\Phi/T_C),$$

где  $\delta E$  – элементарное приращение тепловой энергии в круговом процессе.

На величины налагаются ограничения-неравенства:

$$E_\Gamma, E_\Phi > 0, \quad 0 < B_H,$$

$$T_H < T_X^m \leq T_X \leq T_B, \quad T_X < T_K < T_\Gamma \leq T_\Gamma^M,$$

$$T_T \leq T_\Phi \leq T_\Phi^M,$$

где  $^m$  – индекс минимально допустимой величины,  $^M$  – индекс максимально допустимой величины. В безразмерных величинах соотношения принимают вид

$$r_{y\delta} = v_C - v_H = (\theta_\Phi - \theta_C)^{1/2} - (\theta_B - 1)^{1/2},$$

$$e_\Gamma + e_\Phi = \theta_\Gamma - \theta_K + \theta_\Phi - \theta_T,$$

$$\theta_K - \theta_X = \theta_\Gamma - \theta_T,$$

$$\theta_B \theta_K / \theta_X - (\theta_\Gamma / \theta_T)(\theta_\Phi / \theta_C) = 0,$$

$$e_i > 0, \quad 1 < \theta_X^m \leq \theta_B, \quad \theta_X^m \leq \theta_X < \theta_K < \theta_\Gamma \leq \theta_\Gamma^M,$$

$$\theta_T \leq \theta_\Phi \leq \theta_\Phi^M,$$

$r_{y\partial}$  – удельная тяга,  $v_j$  – скорость,  $\theta_j$  – температура,  $e_j$  – расход тепловой энергии топлива,

$$R = r_{y\partial}(2c_p T_H)^{1/2} B_H, \quad V_j = v_j(2c_p T_H)^{1/2},$$

$$T_i = \theta_i T_H, \quad E_i = e_i c_p T_H B_H.$$

*Оптимизация, сравнения.*

Полагается:  $r_{y\partial}$  – единый критерий;  $\alpha$  – вектор параметров оптимизационной задачи – вектор параметров семейства локально-оптимальных представителей подтипа «ТРДФИ»,  $\alpha = (\theta_B, \theta_X^m, \theta_G^M, \theta_\Phi^M)$ ;  $x$  – вектор переменных,  $x = (e, \theta_X, \theta_K, \theta_G, \theta_T, \theta_\Phi, \theta_C)$ . Ставится задача: найти

$$\text{Arg max}_{x \in X} r_{y\partial}(\alpha, x), \quad \max_{x \in X} r_{y\partial}(\alpha, x),$$

где  $X$  – множество допустимых значений  $x$ , задаваемое приведенными выше соотношениями.

Задача решается методом исключения зависимых переменных. Величины  $\theta_X, \theta_K, \theta_G, \theta_\Phi$  полагаются независимыми переменными. С исключением  $\theta_C, \theta_T$  подстановками их выражений в выражение тяги оно принимает вид

$$r_{y\partial} = [\theta_\Phi(1 - \theta_X \theta_G / (\theta_B \theta_K (\theta_G - \theta_K + \theta_X)))]^{1/2} \cdot (\theta_B - 1)^{1/2}.$$

Максимум  $r_{y\partial}$  по  $\theta_X, \theta_K, \theta_G, \theta_\Phi$  достигается при

$$\theta_X = \theta_X^0 = \theta_X^m, \quad \theta_G = \theta_G^0 = \theta_G^M, \quad \theta_\Phi = \theta_\Phi^0 = \theta_\Phi^M,$$

$$\theta_K = \theta_T = \theta_K^0 = \theta_T^0 = (\theta_G + \theta_X)/2,$$

где индексом <sup>0</sup> помечены оптимальные величины.

Результаты преобразования «ТРДФ → ТРДФИ»:

удельная мощность компрессора увеличивается –

$$((\theta_K - \theta_X) > (\theta_K - \theta_B)_{\text{ТРДФ}})^0;$$

удельная тяга увеличивается:  $r_{y\partial}^0 > r_{y\partial \text{ТРДФ}}^0$ ;

в идеале ТРДФ вырождается в ПВРД при  $\theta_B = \theta_G$ , ТРДФИ – при  $\theta_X = \theta_G$ , т.е., охлаждение потока между воздухозаборником и компрессором есть средство расширения области применения компрессорных ВРД.

В заключение определяются оптимальные кинематические величины: относительная плотность тока на входе в компрессор, число оборотов ротора оптимизируются условием минимизации лобовой площади остова,

$$q_x = q_x^0 = q_x^M, \quad n = n^0 = n^M,$$

$q$  – относительная плотность тока,  $n$  – число оборотов ротора.

### 1.3. Формы, трактовки программ регулирования

Вводятся обозначения:

$\omega$  – доминантная точка движения ЛА, она же точка формирования остова ТРДФ;

$\mathcal{I}$  – промежуточная точка диапазона функционирования ТРДФИ, в которой происходит выключение-включение процесса охлаждения потока перед компрессором;

$e_X$  – тепловая энергия, расходуемая на испарение жидкости.

Подчеркивается: система автоматического регулирования турбокомпрессора отслеживает величины  $\theta_X^\omega, \theta_X$ .

В концепции регулирования сферы формирований виртуальных подтипов полагается: величина  $e_X$  варьируется исключительно системой автоматического регулирования; значением  $\theta_X^\omega$  может быть оптимальная температура охлаждения в проектной точке, температура кипения жидкости, иная проектная температура, более чем ощутимо превышающая температуру атмосферы,  $1 < \theta_X^\omega < \theta_B^\omega$ . Программу регулирования можно выразить в виде

$$(e_{\Gamma}, e_{\Phi}) = \mathbf{var}, T_B \in [T_H, T_B^{\omega}]$$

$$\Downarrow \Downarrow$$

$$(T_{\Gamma}/T_X, T_{\Phi}) = \mathbf{const} = (T_{\Gamma}^{\omega}/T_X^{\omega}, T_{\Phi}^M),$$

$$e_X = \mathbf{var}, T_B \in [T_B^{\dagger}, T_B^{\omega}] \Rightarrow T_X = \mathbf{const} = T_X^{\omega} = T_B^{\dagger},$$

где  $I=K, \Gamma, T$ , изобарный подвод тепла в форсажной камере сгорания обеспечивается изменением площадей протока газа в сопле, при испарении жидкости

$$T_X = \mathbf{const} \rightarrow (n, n_{np} = n/(T_X)^{1/2}) = \mathbf{const} = (n^M, n_{np}^M = n^M/(T_X^{\omega})^{1/2}),$$

при пониженных величинах температуры торможения набегающего потока  $T_X = T_B$ , регулирование аналогично регулированию прототипа,

$$(e_{\Gamma}, e_{\Phi}) = \mathbf{var}, T_B \in [T_H, T_B^{\dagger}]$$

$$\Downarrow \Downarrow$$

$$(T_{\Gamma}/T_B, T_{\Phi}) = \mathbf{const} = (T_{\Gamma}^{\dagger}/T_B^{\dagger}, T_{\Phi}^M).$$

В рамках этой программы воздействие охлаждения потока на тягу, выражение которой в абсолютных температурах

$$R_{y\vartheta}/(2c_p)^{1/2} = [T_{\Phi}(1 - T_X T_{\Gamma}/(T_B T_K T_T))]^{1/2} - (T_B - T_H)^{1/2},$$

можно описать двумя связанными циклами.

\* Обобщенный цикл, являющийся *циклом регуляции величин турбокомпрессора*. При регулировании его законом  $n_{np} = \mathbf{const}$  форма выражения температуры потока в срезе сопла (имеется ввиду выражение в абсолютных температурах) с точностью до обозначений индексов будет такой же, как и у прототипа.

\* Цикл-дополнение (рис.2, очерчен линиями в квадратных точках) - *холодильный цикл*, изменяющий состояние потока перед компрессором.

Условия замыкания циклов имеют вид

$$\oint \delta E/T)_{\vartheta K} = 0 \Rightarrow T_K/T_{\vartheta} = (T_{\Gamma}/T_T)(T_{\Phi}/T_C),$$

$$\oint \delta E/T)_{\vartheta X} = 0 \Rightarrow T_B/T_H = T_X/T_{\vartheta},$$

где  $\vartheta$  - обозначение состояния потока при условном изэнтропийном приведении его из состояния  $X$  в состояние с атмосферным давлением. Таким образом,  $\theta_{\vartheta} = \theta_X/\theta_B$ , при охлаждении перед компрессором температура потока перед соплом остается неизменной, удельная тяга максимальных режимов

$$r_{y\vartheta} = [\theta_{\Phi}^M(1 - \theta_{\vartheta}(\theta_{\Gamma}/(\theta_K \theta_T))^{\omega} \theta_X^{\omega}/\theta_X)]^{1/2} - v_H.$$

Следует ожидать, на практике будут альтернативы исходному формированию остова, исходной концепции регулирования. Суть альтернатив заключается в следующем:

- ◆ Остов ТРДФИ формируется при  $\theta_B = \theta_B^{\dagger}$  (в идеале остов будет тот же, что и при  $\theta_B = \theta_B^{\omega}$ ).
- ◆ Системой автоматического регулирования исполняется традиционная комбинация кардинальных законов

$$e_{\Gamma} = \mathbf{var}, \quad \theta_B \in [1, \theta_B^{\leftrightarrow}] \Rightarrow n_{np} = \mathbf{const}$$

$$\vee \quad \theta_B \in [\theta_B^{\leftrightarrow}, \theta_B^{\omega}] \Rightarrow n = \mathbf{const},$$

где  $\leftrightarrow$  - точка переключения законов,  $\theta_B^{\leftrightarrow} = \theta_B^{\dagger}$ , если величина  $\theta_X^{\omega}$  - температура кипения жидкости.

- ◆ Режим охлаждения потока – прежний,

$$\theta_B \in [\theta_B^{\dagger}, \theta_B^{\omega}] \quad e_X = \mathbf{var} \Rightarrow \theta_X = \mathbf{const} = \theta_X^{\omega} = \theta_B^{\dagger},$$

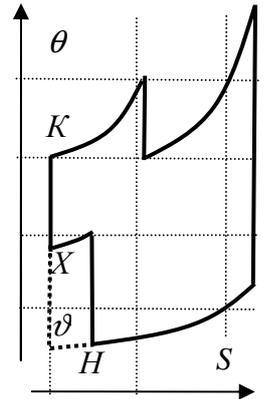


Рис. 2. S – энтропия

но он по аналогии с режимом максимального форсирования тяги расходом дополнительного топлива задается пилотом.

- ◆ При базовом регулировании условием  $n = const$  допускаются вариации моментов включения и выключения охлаждения, режимы частичного охлаждения потока. Они существенны в силу ограниченного ресурса жидкости.
- ◆ По аналогии с управлением форсирования тяги расходом дополнительного топлива вводится *управление форсирования тяги охлаждением*, например, в форме

$$\theta_X = \theta_B - u_X(\theta_B - \theta_X^{\omega}), \quad \theta_B > \theta_X^{\omega}, \quad 0 \leq u_X \leq 1,$$

где  $u_X$  – управление ТРДФИ охлаждением.

- ◆ Форма базового комбинированного закона регулирования по замеряемой непосредственно перед компрессором температуре потока и отметкой возможности управления охлаждением принимает вид

$$(e_T, e_\Phi) = \mathit{var}, \quad \theta_B \in [1, \theta_B^{\omega}], \quad \theta_X = \theta_B - u_X(\theta_B - \theta_X^{\omega}), \quad \theta_B > \theta_X^{\omega},$$

$$\theta_X \in [1, \theta_X^{\omega}]$$

$$\theta_X \in [\theta_X^{\omega}, \theta_B^{\omega}]$$

$$\Downarrow \Downarrow$$

$$\Downarrow \Downarrow$$

$$(n_{np}, \theta_\Phi) = \mathit{const}$$

$$(n, \theta_\Phi) = \mathit{const}.$$

Таким образом, в проектном диапазоне отношение максимальных удельных тяг ТРДФИ, прототипа

$$r_{y\theta \text{ТРДФИ}} / r_{y\theta \text{ТРДФ}} > 1$$

потому, что: остов ТРДФИ сформирован с учетом позитивности охлаждения потока перед компрессором в проектной точке; остов турбокомпрессора ТРДФИ отвечает формированию его при пониженной температуре торможения набегающего потока; в окрестности проектной точки

$$\theta_X = \mathit{const} \rightarrow (n, n_{np}) = \mathit{const} = (n^M, n_{np}^M).$$

*Примечания.*

1. Охлаждение потока в качестве регулирующего фактора автоматического регулирования облегчает решение проблемы регулирования воздухозаборника.
2. Охлаждение потока перед компрессором ( $T_X < T_B$ ) при  $n = \mathit{const}$  означает увеличение абсолютной тяги не только из-за увеличения удельной тяги, но и из-за увеличения расхода воздуха:

$$B_X = q_x F_x p_X / T_X^{1/2} \hat{C},$$

где  $F$  – площадь протока,  $p$  – давление,  $\hat{C}$  – константа в переменных состояниях функционирования ВРД.

3. Охлаждение потока в качестве автономного управления усложняет проблему регулирования воздухозаборника.

## 2. Подтип с охлаждением потока перед компрессором электрифицированной подсистемой

### 2.1. Схема, предварительные замечания

Преобразование «ТРДФ → ТРДФ с электрифицированной подсистемой перед компрессором (ТРДФЭ)» заключается в установке автономной подсистемы, состоящей из авиатермобатареи [1], электромотора, вентилятора. В схеме (рис. 3, 1 – электромотор, 2 – вентилятор, 3 – пакет подогреваемых спаев, 4 – пакет охлаждаемых спаев) охлаждаемые спаи обтекаются внешними слоями атмосферы. Что же касается подогреваемых спаев, то возможны варианты их расположения: перед вентилятором, в

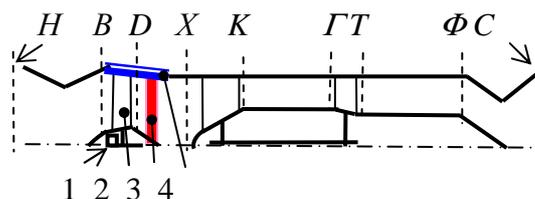


Рис. 3. Схема ТРДФЭ

лопатках вентилятора, за вентилятором. Выбранный вариант положения пакета подогреваемых спаев в идеале обеспечивает максимальный уровень эффективности авиа-термобатареи: электродвижущая сила тем больше, чем больше разность температуры между спаями термоэлемента.

Авиа-термобатарея (АТБ<sub>D</sub>) воздействует на состояние объемного потока через ограничивающие его поверхности. Следует ожидать: мощность вентилятора, изменение состояния потока перед компрессором будут относительно небольшими. Маломощность вентилятора позволяет проектировать его эффективным элементом системы регулирования, в котором могут варьироваться и положения вращающихся лопаток. В этих прогнозах маломощность вентилятора ТРДФЭ прежде всего обуславливается маломощностью АТБ<sub>D</sub>.

Производимая АТБ<sub>D</sub> электроэнергия существенно зависит от температуры торможения набегающего потока, ротор вентилятора будет вращаться с переменной скоростью, расход воздуха будет ограничиваться пропускной способностью вентилятора. Полагается: расход воздуха, задаваемый режимом функционирования турбокомпрессора, в идеале обеспечивается изменением площадей протока в вентиляторе.

## 2.2. Модель оптимизации, сравнения

Принимается: обтекание подогреваемых спаев – изобарный процесс, температура равна температуре потока на выходе из вентилятора; электроэнергия эквивалентна энергии сжатия потока; сжатие потока – изэнтропийный процесс; температура охлаждаемых спаев равна температуре невозмущенной атмосферы. В безразмерных величинах соотношения идеальной термореактивной системы «ТРДФЭ» в точке формирования остова имеют вид

$$\begin{aligned} r_{y\partial} &= v_C - v_H = (\theta_\Phi - \theta_C)^{1/2} - (\theta_B - 1)^{1/2}, \\ e &= e_\Gamma + e_\Phi = \theta_\Gamma - \theta_K + \theta_\Phi - \theta_T, \quad \theta_D = \theta_B + \varepsilon_D, \\ \theta_K - \theta_X &= \theta_\Gamma - \theta_T, \quad \theta_X = \theta_D - \varepsilon_D / (1 - \eta_\partial), \\ \theta_D \theta_K / \theta_X - (\theta_\Gamma / \theta_T) (\theta_\Phi / \theta_C) &= 0, \\ e_i > 0, \quad 0 \leq \varepsilon_D \leq \varepsilon_D^M, \quad 0 \leq \eta_\partial < 1, \\ 1 \leq \theta_B, \quad \theta_X < \theta_K < \theta_\Gamma \leq \theta_\Gamma^M, \quad \theta_T \leq \theta_\Phi \leq \theta_\Phi^M, \end{aligned}$$

где  $\varepsilon_D$  - электроэнергия АТБ<sub>D</sub>,  $\eta_\partial$  - коэффициент полезного действия авиа-термобатареи.

Оптимизационная задача:  $r_{y\partial}$  - единый критерий;  $\alpha$  - вектор параметров семейства оптимальных остовов,  $\alpha = (\theta_B, \varepsilon_D^M, \eta_\partial, \theta_\Gamma^M, \theta_\Phi^M)$ ;  $x$  - вектор переменных,  $X$  - множество допустимых значений  $x$ ,

$$\begin{aligned} x &= (e_\Gamma, e_\Phi, \varepsilon_D, \theta_D, \theta_X, \theta_K, \theta_\Gamma, \theta_T, \theta_\Phi, \theta_C), \quad x \in X, \\ x = x^0 &= \text{Arg max}_{x \in X} r_{y\partial}(\alpha, x), \quad r_{y\partial} = r_{y\partial}^0 = \max_{x \in X} r_{y\partial}(\alpha, x). \end{aligned}$$

Решается исключением зависимых переменных:  $\varepsilon_D, \theta_K, \theta_\Gamma, \theta_\Phi$  - независимые переменные, выражение тяги -

$$r_{y\partial} = [\theta_\Phi (1 - \theta_X \theta_\Gamma / (\theta_D \theta_K (\theta_\Gamma - \theta_K + \theta_X)))]^{1/2} - (\theta_B - 1)^{1/2},$$

где  $\theta_D = \theta_B + \varepsilon_D$ ,  $\theta_X = \theta_D - \varepsilon_D / (1 - \eta_\partial)$ .

Максимум  $r_{y\partial}$  по  $\varepsilon_D, \theta_X, \theta_K, \theta_\Gamma, \theta_\Phi$  достигается при

$$\varepsilon_D = \varepsilon_D^0, \quad \theta_X = \theta_X^0 = \theta_X^m, \quad \theta_\Gamma = \theta_\Gamma^0 = \theta_\Gamma^M, \quad \theta_\Phi = \theta_\Phi^0 = \theta_\Phi^M,$$

$$\theta_K = \theta_T = \theta_K^0 = \theta_T^0 = (\theta_\Gamma + \theta_X) / 2,$$

где  $\varepsilon_D^0 = \varepsilon_D^M$  при  $\varepsilon_D^M \leq \varepsilon_D'$ , в противном случае  $\varepsilon_D^0 = \varepsilon_D'$ ,  $\varepsilon_D'$  - решение уравнения

$$\partial r_{y\partial} / \partial \varepsilon_D = 0$$

(при  $\varepsilon_D = 0$   $\partial r_{y\partial} / \partial \varepsilon_D > 0$ ; в силу скоротечности процесса, несовершенства первых АТБ ожидается:  $\varepsilon_D^M \ll \varepsilon_D'$ ).

Результаты преобразования «ТРДФ → ТРДФЭ»:

Э Удельная мощность компрессора увеличивается:  $((\theta_K - \theta_X > (\theta_K - \theta_B)_{\text{ТРДФ}})^0$ , но по сравнению с ТРДФИ она увеличивается в меньшей степени.

- Э Удельная тяга увеличивается:  $r_{y\partial\text{ТРДФЭ}}/r_{y\partial\text{ТРДФ}} > 1$ .
- Э ТРДФЭ вырождается в ПВРД при  $\theta_X = \theta_\Gamma$ . В идеале  $\theta_{X\text{ТРДФИ}} < \theta_X < \theta_B$ , охлаждение потока между воздухозаборником и компрессором - средство расширения областей применения компрессорных ВРД.
- Э По эффективности использования тепловой энергии топлива ТРДФЭ превосходит ТРДФИ.
- Э При  $\eta_s \gg 0$  ТРДФЭ превосходит прототип по эффективности использования тепловой энергии топлива.

### 2.3. Программа регулирования

В сфере формирований виртуальных подтипов ее представляют три подпрограммы.

1. Первая подпрограмма по состоянию потока перед компрессором регулирует состояние турбокомпрессора.
2. Вторая подпрограмма – форсирование тяги перед соплом.
3. Третья подпрограмма по состоянию потока перед вентилятором *регулирующими факторами вентилятора* влияет на состояние потока перед компрессором. Таковыми могут быть регулирующие факторы-обобщения: площадь протока в вентиляторе (обеспечение расхода воздуха, определяемого режимом функционирования турбокомпрессора); угол атаки лопаток, оптимизирующий превращение электроэнергии в энергию давления газов за вентилятором. В идеале по причине относительно малой мощности АТБ<sub>D</sub> влияние регулирующих факторов вентилятора не обозначается. Предполагается: АТБ<sub>D</sub> постоянно функционирует в режиме производства максимальной электроэнергии, он и определяет состояние потока перед компрессором. В переменных условиях функционирования

$$\varepsilon_D = \varepsilon_D^\omega (\theta_D - 1) / (\theta_D^\omega - 1),$$

$$\theta_D = \theta_B + \varepsilon_D, \quad \theta_X = \theta_D - \varepsilon_D / (1 - \eta_s),$$

программа регулирования имеет вид

$$\theta_X \in [1, \theta_X^\omega] \subset [1, \theta_B^\omega], \quad (e_\Gamma, e_\Phi) = \text{var} \Rightarrow (n_{np}, \theta_\Phi) = \text{const.}$$

### 3. Подтип с нагнетателем-регулятором потока перед компрессором

Коррекция «ТРДФ → ТРДФ с нагнетанием потока в компрессор (ТРДФН)» (рис. 4, 1 – нагнетатель) в локальной точке воспринимается как бесперспективное отделение от компрессора прототипа первых ступеней. Оно становится перспективным при проекте этого подтипа ТРДФ для продвижения ЛА со значительной сверхзвуковой скоростью в предположениях:

1. Регулирование компрессора не дает желательного эффекта при нерегулируемых площадях протока в турбине.
2. Площади протока в остове компрессора ТРДФН (основной части компрессора прототипа) неизменны.
3. Применяется закон регулирования  $n_{np} = \text{const.}$  Температура торможения потока, по которой автоматическое регулирование изменяет расход топлива в основной камере сгорания, измеряется между нагнетателем (по иному - вентилятором) и компрессором, в рис. 4 - сечение D.
4. Основное назначение нагнетателя – частичное нивелирование негативного атрибута закона  $n_{np} = \text{const.}$  Суть преобразования заключается в замене входной переменной регулирования, диапазон изменения которой меньше диапазона регулирования прототипа тем же законом.

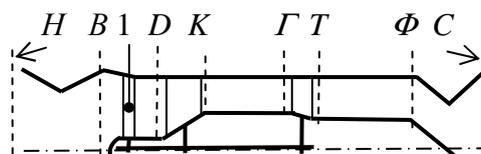


Рис. 4. Схема ТРДФН

5. Средства нивелирования негативных аспектов: расширенные диапазоны регулирования степени повышения давления и площадей протока в нагнетателе. Используются известные способы изменения поджатия потока и площадей протока – повороты *всех* лопаток нагнетателя. Ожидается, будут найдены и применены эффективные способы изменения площадей протока варьированием стенок, ограничивающих поток в радиальных направлениях.
6. Назначение вариаций поджатия потока в нагнетателе – изменение температуры перед компрессором, назначение вариаций площадей протока – обеспечение расхода воздуха, задаваемого регулицией турбокомпрессора.
7. Требование высокого уровня эффективности регулирования лопаточной машины означает: мощность нагнетателя-регулятора будет меньше мощности компрессора, его воздействие на траектории будет ограничено.

Из исследований возможностей агрегатов вытекает: степень повышения давления потока в нагнетателе должна быть минимальной в доминантной точке; она должна быть максимальной в точке взлета. Подчеркиваются условия формирования, принимаются условия регулирования нагнетателя:

1. В формировании остова учитывается: регулиция потока перед компрессором – основное назначение нагнетателя.
2. В точке формирования предельно агрегированных остовов ТРДФ, ТРДФН имеют равную эффективность.
3. Энергия поджатия потока в проектной точке равна минимально допустимой величине.
4. Близ проектной точки энергия поджатия потока - линейно убывающая функция от температуры торможения набегающего потока – нагнетатель регулируется по условию неизменности температуры потока перед компрессором.
5. При достижении текущей энергии поджатия потока максимально допустимой величины воздействие *регулирующих факторов нагнетателя* прекращается.
6. При пониженных значениях  $\theta_B$  нагнетатель регулируется аналогично регулированию прототипа – отношение температур торможения потока за нагнетателем, перед нагнетателем неизменно.

Регулирование ТРДФН можно выразить в виде

$$\theta_B \in [1, \theta_B^{\omega}], \theta_D \in [\theta_D^m, \theta_D^{\omega}], (e_T, e_\phi) = \text{var}$$

⇓⇓

$$(\theta_T/\theta_D, \theta_\phi) = \text{const} = (\theta_T^{\omega}/\theta_D^{\omega}, \theta_\phi^M),$$

$$\theta_B \in [1, \theta_B^{\ddagger}]$$

⇓

$$\theta_D/\theta_B = \text{const} = \theta_D^{\ddagger}/\theta_B^{\ddagger}$$

$$\theta_B \in [\theta_B^{\ddagger}, \theta_B^{\omega}], (F_d, \chi) = \text{var}$$

⇓⇓

$$(\theta_D, B_D/B_d') = \text{const} = (\theta_D^{\omega} = \theta_B^{\ddagger}, 1)$$

где  $\theta_D^m = \theta_D^{\ddagger}/\theta_B^{\ddagger}$ ,  $\ddagger$  - точка включения-выключения воздействий регулирующих факторов нагнетателя,  $i = K, T, F_d$  - фактор-обобщение площадей протока в нагнетателе,  $d$  - индекс критического сечения в рабочем колесе нагнетателя,  $\chi$  - фактор-обобщение углов атаки лопаток нагнетателя, оптимизирующий поджатие потока,  $B_d'$  - расход воздуха, определяемый режимом функционирования нагнетателя,  $B_D$  - расход через турбокомпрессор без возможного ограничения пропускной способности нагнетателя.

Выражение нерасчетной максимальной тяги ТРДФН:

$$r_{y\partial} = [\theta_\phi^M (1 - (\theta_T/(\theta_K \theta_T))^{\omega} \theta_D^{\omega}/\theta_D)]^{1/2} - v_H,$$

отношение максимальных удельных тяг ТРДФН, прототипа -

$$r_{y\partial \text{ТРДФН}}/r_{y\partial \text{ТРДФ}} > 1.$$

## 4. Двухроторный подтип с электропередачей энергий

### 4.1. Предварительные замечания, схема

Суть коррекции «ТРДФЭ → ТРДФЭ первой модификации (ТРДФЭ1)» заключается в увеличении мощности нагнетателя, в обобщении подтипов ТРДФЭ и ТРДФН в аспекте передачи энергии от турбокомпрессора к вентилятору. Основная цель коррекции – повышение уровня эффективности управления и автоматического регулирования. В ТРДФЭ1 включаются: вторая авиа-термобатарея; электромотор↔генератор, способный функционировать и как преобразователь электроэнергии в механическую энергию, и как генератор - преобразователь энергии вращения ротора турбокомпрессора; механизмы электропередачи.

Вторая АТБ (АТБ<sub>0</sub>) функционирует на тепле, которое приходится отводить подсистемой охлаждения элементов конструкции (спаи могут быть «встроенными» во фрагменты конструкции, близкие к высокотемпературным зонам потока). В моделировании предельных абстракций процесс охлаждения конструкции не формализуется, такое тепло есть «даровое» тепло, фактор его оттока (в атмосферу) не влияет на поток в турбокомпрессоре. В рис. 5 условное изображение пакета спаев АТБ<sub>0</sub> – 1, 2 – электромотор↔генератор.

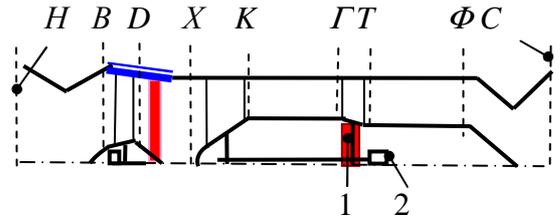


Рис. 5. Схема ТРДФЭ1

Негативные аспекты коррекции: конструкция усложняется, вес увеличивается.

Позитивные аспекты коррекции:

- мощность вентилятора, обусловленная маломощностью АТБ<sub>D</sub>, увеличивается;
- температура подогреваемых спаев у АТБ<sub>0</sub> будет больше, чем у АТБ<sub>D</sub>, отнесенная к площади подогреваемых спаев мощность у АТБ<sub>0</sub> будет больше, чем у АТБ<sub>D</sub>;
- влияние переменной температуры подогреваемых спаев на мощность у АТБ<sub>0</sub> будет слабее, чем у АТБ<sub>D</sub>;
- максимальная тяга увеличится;
- уровень эффективности использования энергии топлива повысится.

### 4.2. Специфика регулирования, управления

Состояние потока перед турбокомпрессором ТРДФЭ1 определяется соотношениями

$$\theta_D = \theta_B + \varepsilon_D + \varepsilon_O, \quad \theta_X = \theta_D - (\varepsilon_D + \varepsilon_O)/(1 - \eta_\varepsilon), \quad 0 \leq \varepsilon_O \leq \varepsilon_O^M,$$

где  $\varepsilon_O$  - производимая АТБ<sub>0</sub> электроэнергия. Расходуемая электроэнергия АТБ<sub>0</sub> в переменных условиях функционирования определяется соотношениями

$$\varepsilon_O = \varepsilon_O^\omega (\theta_O - 1)/(\theta_O^\omega - 1), \quad \theta_O/\theta_X = (\theta_O/\theta_X)^\omega,$$

где  $\theta_O$  - температура подогреваемых спаев АТБ<sub>0</sub>.

Форма выражений удельной тяги, условий формирования оптимального остова турбокомпрессора, программы регулирования не изменяется:

$$\begin{aligned} r_{y\partial} &= [\theta_\Phi (1 - \theta_X \theta_T / (\theta_D \theta_K \theta_T))]^{1/2} - (\theta_B - 1)^{1/2}, \\ \theta_T &= \theta_T^0 = \theta_T^M, \quad \theta_K = \theta_T = \theta_K^0 = \theta_T^0 = (\theta_T + \theta_X)/2, \\ (e_T, e_\Phi) &= \text{var}, \quad \theta_X \in [1, \theta_X^\omega] \subset [1, \theta_B^\omega] \end{aligned}$$

⇓⇓

$$(n_{np}, \theta_\Phi) = \text{const},$$

однако легко показывается, что

$$[1, \theta_X^\omega]_{\text{ТРДФЭ1}} \subset [1, \theta_X^\omega]_{\text{ТРДФЭ}},$$

программа регулирования у ТРДФЭ1 эффективнее, чем у ТРДФЭ.

Программа регулирования в первых оценках подтипа полагается базовой в несколько более подробном описании. В ее ограничениях удельная тяга может быть выражена в виде

$$r_{y\theta} = [\theta_{\phi}^M (1 - \theta_{\alpha}(\theta_T/(\theta_K\theta_T))^{\omega} \theta_X^{\omega}/\theta_X)]^{1/2} - v_H = \\ = [\theta_{\phi}^M (1 - \theta_{\alpha}(\theta_T/(\theta_K\theta_T))^{\omega}) - \theta_D + \theta_X]^{1/2} - v_H,$$

где  $\theta_{\phi} = \theta_X/\theta_D$ ,  $\omega$  - индекс режима подобия температур турбокомпрессора, АТБ - постоянный фактор производства тяги.

В автоматическое регулирование, управление перспективно включение элементов регуляции, управления кратковременно действующим фактором - расходом электроэнергии аккумуляторов. Их влияние дополнительно повышает уровень эффективности ТРДФЭ1:

- + Взлетную тягу можно увеличить использованием энергии, аккумулированной от внешнего источника и при аэродромном маневрировании. Если ограничения возможностей электрифицированной подсистемы перед компрессором допускают расходование дополнительной энергии и количество аккумулированной энергии достаточно большое, то ее можно расходовать и в подсистеме перед компрессором, и в электромоторе↔генераторе для увеличения давления газа за турбиной (с уменьшением работы турбины уменьшается критическая площадь протока в сопле).
- + На траектории при пониженном режиме функционирования можно аккумулировать энергию.
- + На траектории можно форсировать тягу расходом аккумулированной электроэнергии.
- + Появляется возможность реализации специфических режимов ТРДФЭ1 маневренной авиации, в котором при относительно медленном изменении скорости вращения инертного ротора, максимальных текущих температурах на выходе из камер сгорания быстро изменяется величина тяги. Например: электромотор↔генератор переводится в состояние зарядки аккумулятора – работа турбины увеличивается, давление газа за турбиной, тяга уменьшаются; электромотор↔генератор переводится в состояние потребления энергии аккумулятора – работа турбины уменьшается, давление газа за турбиной, тяга увеличиваются.

Анализируется несколько более подробно возможность реализации специфических режимов ТРДФЭ1, позитивное расширение базовой программы регулирования включением регуляции электрических подсистем.

Отмечается специфика военной авиации: важность быстрого маневрирования экстренным торможением и разгоном ЛА на траектории; в маневрировании приоритетны не пределы вариации скорости движения, а ускорения скорости движения и быстрота смены режимов маневрирования. Т.е., в маневрировании вариация температуры торможения набегающего потока относительно невелика, в базовом регулировании вариация вращения ротора ВРД невелика, в агрегированных представлениях ими можно пренебречь.

В оценках эффективности собственно маневрирования ЛА в дополнение к возможным воздействиям вариациями аэродинамического сопротивления желательно быстро изменять состояния функционирования ВРД - «глубокий дроссельный режим↔максимальный режим кратковременного действия». Однако в традиционном образце ВРД они и невозможны, и недопустимы:

невозможно увеличить скорость вращения инертного ротора так быстро, как того требует маневр;

в переходном процессе «глубокий дроссельный режим→→максимальный режим кратковременного действия» температура газа перед турбиной значительно больше, чем в стационарном максимальном режиме базовой программы регулирования, предел прочности элементов конструкции уменьшается;

в переходном процессе состояние компрессора близко к недопустимому состоянию «помпажа», при неоднократном исполнении переходного разгонного процесса вероятность разрушения ВРД существенно увеличивается.

В приводимом ниже упрощенном примере коррекции базовой программы регулирования принимается:

- У подсистема перед компрессором автономна, ее электроэнергия – энергия авиатермобатарей;
- У базовым регулированием выдерживается максимальная приведенная скорость вращения ротора;
- У исходное состояние: максимальная тяга по базовой программе регулирования, аккумулятор разряжен;
- У время маневра, абсолютная разность скоростей движения ЛА начала и окончания маневра таковы, что можно пренебречь обусловленными базовым регулированием вариациями скорости вращения ротора;
- У существует такой режим минимального форсирования потока энергией топлива перед соплом, с которого вывод в режим максимального форсирования выполняется практически мгновенно.

*Примерные подпрограмма регулирования,  
управление электрических подсистем.*

- I. Вводится дискретное управление экстренными режимами ТРДФЭ1: экстренная минимальная тяга; экстренная максимальная тяга.
- II. Режим экстренной минимальной тяги: → Подпрограммой регулирования электромотор↔генератор переводится в состояние быстрой зарядки аккумуляторов, режим форсирования потока энергией топлива перед соплом – в режим минимального форсирования. С практически мгновенным увеличением критической площади сопла тяга уменьшается. В агрегированной модели выражение удельной тяги имеет вид

$$r_{y\partial} = r_{y\partial}^{\partial m} = [\theta_{\phi}^{\partial m} (1 - \theta_{\delta} (\theta_T / \theta_K)^{\partial} / (\theta_T^{\partial} - \partial^3)) - \theta_D + \theta_X]^{1/2} - v_H,$$

где  $\partial m$  – индекс экстренной минимальной тяги,  $\partial^3$  – индекс зарядки аккумуляторов.

- III. Режим экстренной максимальной тяги: → Электромотор↔генератор переводится в состояние быстрой разрядки аккумуляторов, режим форсирования потока перед соплом – в режим максимального форсирования. С уменьшением критической площади сопла тяга увеличивается. Выражение удельной тяги имеет вид

$$r_{y\partial} = r_{y\partial}^{\partial M} = [\theta_{\phi}^{\partial M} (1 - \theta_{\delta} (\theta_T / \theta_K)^{\partial} / (\theta_T^{\partial} + \partial^p))]^{1/2} - v_H,$$

где  $\partial M$  – индекс экстренной максимальной тяги,  $\partial^p$  – индекс разрядки аккумуляторов.

В примерной подпрограмме регулирования продолжительность маневра ограничивается возможностями аккумуляторов, эффективностью регуляции мощности турбины изменением площадей протока газа в сопле.

Возможно, будет перспективным расширение подпрограммы регулирования экстренных режимов подключением ресурсов регуляции электрической подсистемы перед компрессором. Оно определено будет перспективным, если эксперименты покажут: есть весьма ощутимые диапазоны по поджатию воздуха в вентиляторе и по охлаждению потока перед компрессором, такие, что варьирование состояния потока перед компрессором безопасно. Тут суть проблемы заключается в том, что и при малых вариациях температуры торможения набегающего потока замеряемая базовой системой автоматического регулирования температура перед компрессором может изменяться значительно. При резких изменениях этой температуры по сравнению с относительно плавным изменением входной температуры традиционного регулирования могут возникнуть нежелательные колебания скорости вращения инертного ротора.

### Литература

1. Жуков А.Н. Об энергии термоэлектричества в производстве реактивной силы. ВЦ РАН, 2013.