

А.Н. ЖУКОВ

**АВИАДВИГАТЕЛИ С ТЕПЛООБМЕНОМ
МЕЖДУ ЗОНАМИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ: ВОЗМОЖНОСТИ
ПРОТОТИПОВ, ВАРИАНТОВ КОРРЕКЦИЙ**

Анализируются основы формирования авиационных двигателей со смешением газовых потоков, регенерацией выхлопного газа, охлаждениями сжимаемого воздушного потока. Возможности примерных виртуальных подтипов сопоставляются с возможностями прототипов в сфере формирования предельно допустимых абстракций.

ВВЕДЕНИЕ

Анализируются традиционные направления совершенствования воздушно-реактивных двигателей (ВРД) в агрегированной сфере теории: основа - нулевой уровень описаний, абстракции - *идеальные термореактивные системы* с регенерацией тепловой энергии зон газовых потоков, охлаждения зон ведущего потока [1 - 4]. Направления исследуются на примерных модификациях типов «турбореактивный двигатель (ТРД)», «ТРД двухконтурный с отдельными потоками (ТРДД)», «ТРД с форсажной камерой сгорания (ТРДФ)», «примерность» заключается в выражении сути корректирования как можно простыми способами.

Основными положениями моделирования являются:

- потоки - одномерные установившиеся, в диффузоре поток заторможен, в сопле расширен до атмосферного давления.
- коррекции структур не влияют на значения предельных температур потоков, результаты теплообмена не зависят от способа теплообмена, смешение потоков аппроксимирует смешение заторможенных потоков;
- в диффузоре, компрессоре, турбине, сопле изменение состояния газа изоэнтальпийное, в теплообменниках, камерах сгорания – изобарное.

Обозначается исходная позиция исследований.

В [1 - 3] рассматриваются процессы регенерации тепловой энергии потока перед соплом, охлаждения сжимаемого потока, однако замкнутые модели функционирования, формальные ориентиры детализации ВРД с механизмами исполнения этих процессов в учебной литературе не представлены.

В технической литературе рассматривается вариант регенерации, заключающийся в расширении выхлопного газа до атмосферного давления с последующим замыканием термодинамического цикла изотермическим отводом тепла.

Представляются, моделируются, анализируются возможности модификаций:
с регенерацией тепла

частично сжатого воздушного потока в поток перед соплом;

потока перед соплом в частично сжатый воздушный поток;

с отводом в атмосферу тепловой энергии

потока за промежуточной ступенью компрессора;

трансформируемого потока за турбиной.

Отмечается специфика подтипов ТРДД, ТРДД со смешением потоков (ТРДДсм) с отводом тепла из зон потока ведущего контура в ведомый контур, в атмосферу.

По результатам проведенного анализа формируется рациональный виртуальный подтип «ВРД с регенерационным петлевым потоком (ВРДрпп)».

ВРДрпп - разновидность двухконтурного двигателя. Суть формирования его остова: поток ведущего контура расширяется в турбине до давления, сопоставимым давлением торможения набегающего на ВРДрпп потока; за турбиной поток ведущего контура по-

ворачивается, смешивается с потоком ведомого контура перед вентилятором. Ожидается, что варианты подтипа могут быть эффективными в практике дозвуковой авиации.

1. О регенерации тепла в авиационных условиях

Имеющиеся результаты исследований регенерации тепла обобщаются следующим образом:

- ожидается повышение уровня эффективности ВРД с регенерацией теплоты из зоны потока перед соплом;
- построения ВРД с известными способами теплообмена не доведены до серийных образцов изделий;
- неприемлемые по меркам предыдущих периодов развития авиации вес теплообменных устройств, дополнительные потери механической энергии газовых потоков – основные причины, мешающие вводу в эксплуатацию этих ВРД;
- экологическое состояние авиации тем выше, чем выше уровень *терморактивной эффективности* ВРД (критерии – тяга, импульс тяги по энергии топлива), возврат к формированиям ВРД с повышенным уровнем именно этой составляющей актуален.

В принципе возможна регенерация исполнением цикла с изотермическим отводом тепла (рис. 1, T – температура, S – энтропия): регенерация происходит при расширении его до температуры атмосферы, ее уровень эффективности выше, чем при изобарном теплообмене, но в современных условиях практическое проектирование с ориентацией на изотермическое восстановление давления скоростной реактивной струи бесперспективно.

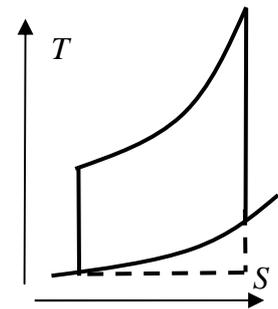


Рис. 1.

Рассматриваются циклы с изобарным теплообменом.

Разработка новых механизмов теплообмена, иной интеграции подсистем в систему, трансформирование теплообменника в подсистему двойного, тройного назначения, совершенствование методологии – традиционные пути проектирования. Теория ВРД указывает: рациональный процесс построения начинается с формирований предельных абстракций, вывода ориентиров рабочего проектирования.

1.1. О ТРД с изобарной регенерацией

Рассматривается вариант известной схемы подогрева воздушного потока перед камерой сгорания ТРД теплотой, отбираемой из зоны потока между турбиной и соплом (рис. 2: 1 – воздухозаборник, 2 – компрессор, 3 – теплообменник-нагреватель потока, 4 – камера сгорания, 5 – турбина, 6 – теплообменник-охладитель потока, 7 – сопло, пунктирные линии – характерные сечения потока). Поскольку в идеале существенен факт регенерации, то схема ТРД с изобарной регенерацией жидким теплоносителем (ТРДр) представляет и другие схемы с изобарной регенерацией.

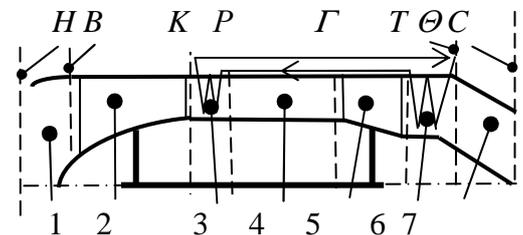


Рис. 2. Схема ТРДр

Основные соотношения – закон сохранения энергии в торможении и разгоне газа, уравнения тяги и полезной работы цикла, закон сохранения тепловой энергии в камере сгорания и условие замыкания цикла при изобарных процессах отвода, подвода тепла имеют вид

$$\begin{aligned} \theta_B &= 1 + v_H^2, & v_C^2 &= \theta_B - 1 + a, & r &= v_C - v_H, \\ a &= e - (\theta_C - 1), & \theta_P + e &= \theta_G, \\ \oint \delta e / \theta &= 0 = \ln((\theta_K \theta_T / \theta_r)(\theta_C / \theta_e)), \end{aligned}$$

где θ , v , a , r , e , $\delta e/\theta$ - соответственно безразмерные температура, скорость, полезная работа цикла, тяга, тепловая энергия топлива, элементарное изменение энтропии в круговом процессе, \ln - натуральный логарифм, размерные величины определяются формулами

$$R = r_{yo}(2c_p T_H)^{1/2} B_B, \quad T_i = \theta_i T_H, \quad E = e c_p T_H B_B, \\ A = a c_p T_H B_B, \quad V_j = v_j (2c_p T_H)^{1/2},$$

c_p - удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, T , V , A , R , E - соответствующие размерные величины, B_B - расход газа. Показанное в рис. 2 направление движения теплоносителя, условие равенства температуры охлаждаемого потока в начале охлаждения температуре подогреваемого потока в конце подогрева описывается соотношениями

$$\theta_K = \theta_O, \quad \theta_P = \theta_T.$$

Значения величин ограничиваются неравенствами

$$0 \leq e \leq e^M, \quad 1 \leq \theta_B \leq \theta_K \leq \theta_P \leq \theta_T \leq \theta_T^M,$$

где e^M - величина, при которой достигается максимум тяги, θ_T^M - максимально допустимая температура газа перед турбиной. Соотношения означают: множество допустимых вариантов регенерации не пусто, регенерация в принципе допустима.

Сравниваются возможности ТРД, ТРДр при равенстве расходов тепловой энергии топлива и температур газа перед турбиной. Соответствующими подстановками (у ТРД $\theta_K = \theta_P$) выражения тяг преобразуются в выражения с величинами, не связанными между собой строгими равенствами:

$$r_{ТРД} = r_{ТРДр} = (\theta_B + e - \theta_T / (\theta_T - e))^{1/2} - v_H,$$

т.е., в идеале ТРД, его подтип с изобарной регенерацией тепла из потока перед соплом в поток перед камерой сгорания имеют равную эффективность.

Из сравнений следует: мощность компрессора в ТРДр меньше, чем в ТРД (рис. 3, где циклы: 1 - ТРД, 2 - ТРДр). На практике коррекция может быть позитивной. Например, если вес устройств теплообмена меньше веса выводимой из конструкции секции компрессора, то по критерию веса ТРДр будет предпочтительнее прототипа, если же по критерию веса конструкции ТРД, ТРДр будут сопоставимыми, то ТРДр будет предпочтительнее прототипа по критерию экологии эксплуатации. Что же касается не идеальности газодинамических процессов, то ТРДр будет предпочтительнее ТРД и по термо-реактивной эффективности, если нежелательные потери механической энергии в ТРДр будут меньше, чем в ТРД.

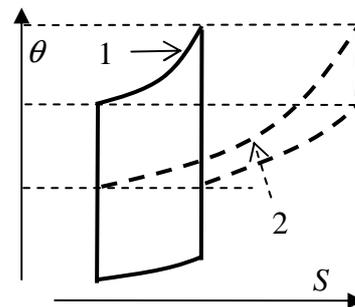


Рис.3

1.2. Об эффективности подтипа ТРДФ с изобарной регенерацией теплоты

Пусть равенство тяг ТРД, ТРДр в идеале есть следствие неэффективности собственно схемы теплообмена (газ расширен лишь частично). В два этапа формируются модификации ТРД, ТРДФ с иной схемой теплообмена.

Первый этап:

- компрессор ТРД разделяется на две секции и между ними устанавливается теплообменник-нагреватель потока;
- в турбине газ расширяется до атмосферного давления;
- за турбиной вводится теплообменник-охладитель потока;
- за камерой с теплообменником-охладителем устанавливается нагнетатель выхлопного газа в сопло.

Из априорных оценок влияния коррекций на форсирование вытекает желательность преобразования типа «ТРДФ».

Второй этап:

допускается расширение газа в турбине до давления, меньшего атмосферного давления;

между нагнетателем и соплом вводится форсажная камера сгорания, подтип обозначается ТРДФр (рис. 4, где 1 – передняя секция компрессора, 2 и 4 – теплообменник-нагреватель и охладитель потока, 3 – задняя секция компрессора, 5 – нагнетатель, 6 – форсажная камера сгорания).

Очевидно, если причиной отсутствия влияния регенерации в идеале является высокое давление охлаждаемого газа, то положительное влияние может возникнуть при низком давлении. Если же причина заключается в недостаточно высоком давлении газа в основной камере сгорания, то оно может быть повышено уменьшением расхода топлива в основной камере сгорания (увеличением мощности компрессора) и дожиганием соответствующей доли в форсажной камере сгорания. Таким образом, конструкция ТРДФр относительно сложна, но она позволяет варьировать величины в расширенных пределах, охватить описание ТРДр как частный случай.

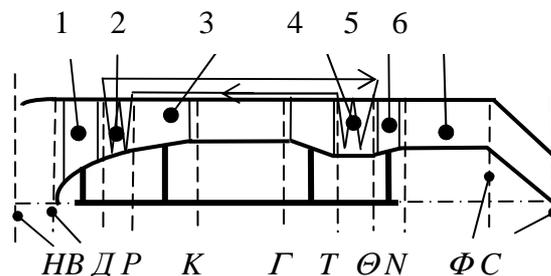


Рис. 4. Схема ТРДФр

Моделируется функционирование идеальной термореактивной системы «ТРДФр». Всевозможные состояния проходящего через двигатель газового потока представляются совокупностью состояний в характерных сечениях, среди которых N – сечение поджатого в нагнетателе потока перед форсажной камерой сгорания. Рассматривается цикл, в котором газ в турбине расширяется до давления более низкого, чем атмосферное давление.

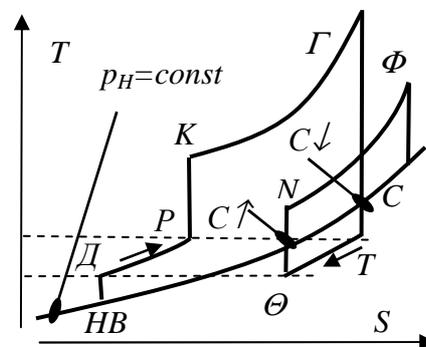


Рис. 5. Цикл ТРДФр

Специфика усложненного цикла ТРДФр заключается в наличии петлевого участка внутри кругового процесса. Работа ожидаемого варианта цикла (рис. 5, p_H – атмосферное давление) выражается суммой работ трех составных циклов

$$\begin{aligned} & - Н-Д-Р-К-Г-С↓-Н, \\ & - С↑-N-Φ-С-С↑, \\ & - С↑-С↓-Т-Θ-С↑ \end{aligned}$$

где дополнительно введены два состояния рабочего тела: $C↓$ – пересечения адиабаты расширения в турбине, $C↑$ – адиабаты сжатия в нагнетателе с изобарой атмосферного давления.

Выражения работ, замыкания циклов имеют вид:

$$\begin{aligned} Н-Д-Р-К-Г-С↓-Н & \Rightarrow a_1 = \theta_\Gamma - \theta_K + \theta_P - \theta_D - \theta_C + 1, \quad \theta_{C↓} \theta_D \theta_K = \theta_T \theta_P, \\ С↑-N-Φ-С-С↑ & \Rightarrow a_2 = \theta_\Phi - \theta_N - \theta_C + \theta_{C↑}, \quad \theta_{C↑} \theta_\Phi = \theta_N \theta_C, \\ С↑-С↓-Т-Θ-С↑ & \Rightarrow a_3 = \theta_{C↓} - \theta_{C↑} - \theta_T + \theta_\Theta, \quad \theta_T \theta_{C↑} = \theta_{C↓} \theta_\Theta, \\ & a = a_1 + a_2 + a_3. \end{aligned}$$

Соотношения – закон сохранения энергии в торможении и разгоне газа, уравнения тяги и закон сохранения тепловой энергии в камерах сгорания имеют вид

$$\begin{aligned} \theta_B &= 1 + v_H^2, & v_C^2 &= \theta_B - 1 + a, \\ r &= v_C - v_H, & e &= \theta_\Gamma - \theta_K + \theta_\Phi - \theta_N. \end{aligned}$$

Множество значений переменных задается неравенствами

$$1 \leq \theta_B \leq \theta_D \leq \theta_P \leq \theta_K \leq \theta_T \leq \theta_T^M, \quad \theta_N \leq \theta_\Phi \leq \theta_\Phi^M$$

где θ_Φ^M – максимально допустимая температура газа в форсажной камере сгорания.

Сравниваются возможности ТРДФ, ТРДФр при равенстве значений расхода тепловой энергии топлива и температуры газа перед турбиной. Соответствующими подстановками ($\theta_D = \theta_P$ у ТРДФ) выражения тяг преобразуются в вид

$$r_{ТРДФ} = r_{ТРДФр} = \{(\theta_B + e)[1 - \theta_G / (\theta_K(\theta_G + \theta_B - \theta_K))]\}^{1/2} - v_H,$$

т.е. дело не в состояниях зон потока, оказывается

изобарная регенерация в рамках идеального единого потока не влияет на терморективную эффективность.

1.3. Об эффективности регенерации в низкотемпературном контуре ТРДД

Формируется подтип ТРДД с регенерацией тепла из потока за турбиной в низкотемпературный контур (ТРДДр):

- ◆ между турбиной и соплом вводится теплообменник-охладитель потока (рис. 6: 1 и 2 – теплообменник-охладитель и нагреватель);
- ◆ между вентилятором и соплом ведомого контура устанавливается теплообменник-нагреватель потока.

Равенство скоростей истечения газов из сопел оптимального представителя ТРДД означает: давление газа в ведомом контуре больше давления газа на выходе из турбины. Следовательно, регенерация тепла из потока за турбиной в ведомый поток в идеале повысит эффективность прототипа.

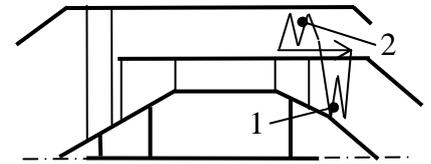


Рис. 6. Схема ТРДДр

Преобразование «ТРДД \Rightarrow ТРДДр» показывает: регенерация будет позитивной и в идеале при наличии высокотемпературного и низкотемпературного циклов.

2. Оценки подтипов с охлаждением воздушного потока при сжатии

2.1. Подтип ТРД с отводом тепла сжимаемого потока в слой атмосферы

В подтипе ТРД с охлаждением сжимаемого потока (ТРДос, в рис. 7 Д и X - сечения потока перед охлаждением и после охлаждения, 1, 4 – передняя, задняя секции компрессора, 2 – обтекаемая атмосферой панель, 3 – спрямляющий аппарат ступени с устройством отвода тепла) поток охлаждается лишь при прохождении через одну промежуточную ступень компрессора с отводом тепла через лопатки. Но он представляет и другие способы отвода тепла, поскольку в сфере теоретических исследований приоритетно отражение самого факта отвода теплоты.

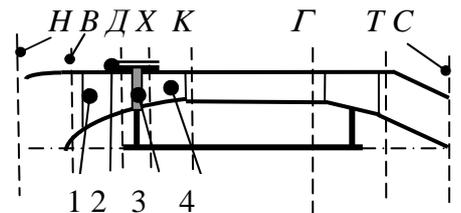


Рис. 7. Схема ТРДос

Основные соотношения имеют вид

$$\theta_B = 1 + v_H^2, \quad v_C^2 = \theta_B - 1 + a, \\ r = v_C - v_H, \quad a = e - \theta_D + \theta_X - (\theta_C - 1), \quad \theta_K + e = \theta_G,$$

$$\oint \delta q / \theta = \ln((\theta_D \theta_K / \theta_X)(\theta_C / \theta_G)) = 0,$$

при отнесении величин a , θ_C , θ_K в разряд зависимых переменных и их исключения выражение тяги принимает вид

$$r_{ТРДос} = \{ \theta_B + e - \theta_D + \theta_X - \theta_X \theta_G / (\theta_D(\theta_G - e)) \}^{1/2} - v_H,$$

величины ограничиваются неравенствами

$$0 \leq e \leq e^M, \quad 1 \leq \theta_B \leq \theta_K \leq \theta_G \leq \theta_G^M$$

и неравенствами-ограничениями возможностей охлаждения: интервалы максимальны в предположении, что секция 1 (рис.7) может быть как секцией компрессора, так и турби-

ной, превращающей кинетическую энергию набегающего потока в энергию вращения ротора. В этом случае они имеют вид

$$1 \leq \theta_X \leq \theta_D \leq \theta_K.$$

Пусть при зафиксированных величинах θ_B , e , θ_T оптимум функционирования определяется условием достижения максимума тяги. Тогда

$$\theta_X^0 = 1, \quad \theta_D^{0 \text{ ТРДос}} = \{\theta_X \theta_T / (\theta_T - e)\}^{1/2}$$

(0 - индекс оптимальной величины).

Сопоставления циклов при равенстве значений расхода тепловой энергии и температуры газа перед турбиной (рис. 8, пунктир - цикл ТРДос) дают результаты:

несмотря на вывод тепла сжимаемого потока ТРДос эффективнее прототипа;

ориентир оптимума ТРДос по расходу энергии топлива:

$$e = e^0_{\text{ТРДос}} = \theta_T - 2(\theta_X \theta_T)^{1/3};$$

ориентир прототипа $e^0_{\text{ТРД}} = \theta_T - (\theta_T)^{1/2}$, так что *охлаждение сжимаемого потока в идеале значительно увеличивает тягу.*

2.2. О регенерации тепла сжимаемого потока

Предполагается: уровень термореактивной эффективности будет еще выше, если в усовершенствованной модификации регенерировать утрачиваемое при сжатии потока в ТРДос тепло. С целью проверки формируется подтип ТРДос с сохранением теплоты сжимаемого потока (ТРДосР):

- компрессор ТРД делится на две секции, между ними вводится теплообменник-охладитель потока;
- в турбине поток расширяется до состояния, позволяющего утилизировать тепло, отводимое от сжимаемого воздушного потока (точка θ_Θ в рис. 9);
- за турбиной вводится теплообменник-нагреватель потока теплом, переносимым из теплообменника-охладителя потока (точка P);

за теплообменником-нагревателем устанавливается нагнетатель газа на вход в сопло (из P в N);

- условия регенерации: $\theta_D = \theta_P$, $\theta_\Theta = \theta_X$.

Моделирование, оптимизация ТРД, ТРДос, ТРДосР вопреки ожиданиям дает результат –

в идеале регенерация тепла сжимаемого потока понижает уровень эффективности ТРДосР, делая его равным

уровню эффективности ТРД;

анализ возможностей ТРДФр, ТРДосР показывает:

в идеале направления процессов регенерации не влияют на уровень термореактивной эффективности.

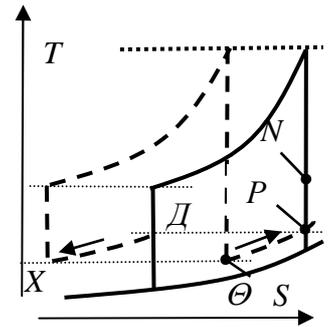
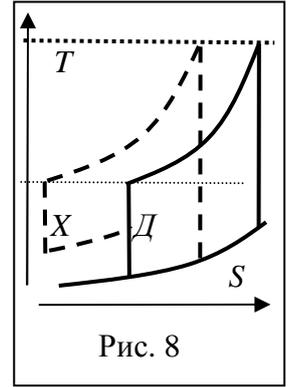
2.3. Подтип ТРДФ с отводом тепла сжимаемого потока в атмосферу

Трансформация «ТРДос → ТРДФос» очевидна. Модель функционирования идеальной системы «ТРДФос» (в состав характерных сечений вводится сечение ϕ) представляет система соотношений

$$\begin{aligned} \theta_B &= 1 + v_H^2, & v_C^2 &= \theta_B - 1 + a, \\ r &= v_C - v_H, & a &= e - \theta_D + \theta_X - (\theta_C - 1), \\ e &= \theta_T - \theta_K + \theta_\phi - \theta_T, & \theta_T - \theta_T &= \theta_D - \theta_B + \theta_K - \theta_X, \end{aligned}$$

$$\oint \delta q / \theta = \ln((\theta_D \theta_K / \theta_X)(\theta_T / \theta_T)(\theta_C / \theta_\phi)) = 0,$$

$$0 < e, 1 \leq \theta_B \leq \theta_D \leq \theta_K \leq \theta_T \leq \theta_T^M,$$



$$\theta_T \leq \theta_\phi \leq \theta_\phi^M \quad 1 \leq \theta_X^n \leq \theta_X \leq \theta_D,$$

где θ_X^n – минимально допустимое значение величины.

Априори ожидается, что с вводом форсажной камеры сгорания при зафиксированной величине тепловой энергии топлива качество влияния охлаждения на термодинамическую эффективность подтипа может быть неоднозначным. Действительно, увеличение максимального давления газа в цикле может быть более чем нивелировано уменьшением температуры реактивного потока за турбиной. Положительный эффект отвода теплоты, аналогичный отводу в ТРДос, ожидается при максимизации тяги по тепловой энергии топлива.

Ставится задача максимизации тяги по переменным θ_K , θ_T , θ_ϕ , θ_D , θ_X .

Выражение тяги преобразуется к виду

$$r_{\text{ТРДФос}} = \{ \theta_\phi [1 - \theta_X \theta_T / (\theta_D \theta_K (\theta_T - \theta_D + \theta_B - \theta_K + \theta_X))] \}^{1/2} - v_H,$$

максимум достигается при

$$\theta_T = \theta_T^0 = \theta_T^M, \quad \theta_\phi = \theta_\phi^0 = \theta_\phi^M, \quad \theta_X = \theta_X^0 = \theta_X^n,$$

$$\theta_K = \theta_K^0 = \theta_T = \theta_T^0 = (\theta_T - \theta_D + \theta_B + \theta_X)/2,$$

величина $\theta_D = \theta_D^0$ определяется решением уравнения

$$\partial r_{\text{ТРДФос}} / \partial \theta_D = 0.$$

Анализ показывает: с переходом к подтипу с форсированием тяги позитивное воздействие охлаждения частично сжатого потока отводом тепла в атмосферу усиливается.

3. Формирование рациональной схемы ВРД под регенерацию тепла, оценки функционирования

3. 1. Схема ВРД с петлевым потоком

Прототип - вариант ТРДД с большой степенью двухконтурности (ВРД дозвуковой авиации). Основа коррекции «ТРДД → ВРД с петлевым потоком (ВРДпп)»:

- ❖ срабатывание почти всего перепад давления в турбинах (до давления торможения набегающего потока) и вывода из них газа с приемлемой для разворота скоростью;
- ❖ исключение из конструкции сопла ведущего контура;
- ❖ поворот, охлаждение ведущего потока в ведомом контуре, затем - в обтекающих ВРД слоях атмосферы и смешение его с потоком, вытекающим из диффузора.

Моделируемая схема сложнее, но она легко вырождается в схему-основу коррекции. Цель усложнения - расширение множеств состояний газов перед сжатием, расширением, теплообменом, смешением. Подсистема с конкретизацией названия результатом вариаций, названа газомеханическим преобразователем (ГМП). Он - секция вентилятора, компрессора, вентилятор, компрессор, либо секция турбины, турбина. В рис. 10: 1 – ГМП1; 2 – камера смешения; 3 – ГМП2; 4 – канал с газом, охлаждаемым слоями атмосферы; 5 – канал, обтекаемый потоком ведомого контура; 6 - ГМП3; стенки канала, через которые тепло отводится, изображены двойными линиями; роторы лопаточных машин объединены единым валом. Предусматриваются возможности: равенства давлений в потоках при смешении (ГМП1); оптимизации состояния ведомого потока перед подогревом его теплом ведущего потока (ГМП2); обеспечения баланса работ лопаточных машин (ГМП3).

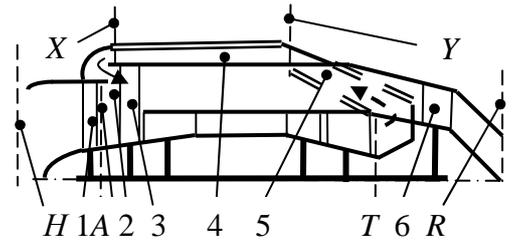


Рис. 10. Схема ВРДпп

3. 2. Модель функционирования, оценки

Вводятся сечения:

H и B – перед ВРДпп и ГМП1;

A и Σ – перед камерой смешения и ГМП2;

D и P – потока ведомого контура перед подогревом и ГМП3;

Θ и R – потока перед соплом и в срезе сопла;

K и Γ – перед камерой сгорания и турбиной;

T , Y и X – перед охлаждением, затем после охлаждения потока ведущего контура в ведомом контуре и затем в атмосфере.

Принимается: в основной турбине газ может быть расширен до атмосферного давления (сечение T); ГМП1 может быть турбиной, превращающей кинетическую энергию набегающего потока в энергию вращения ротора; поскольку расход газа в ведущем контуре не может быть больше расхода газа ведомого контура перед подогревом, то, как следствие встречного движения потоков, температура ведущего потока перед охлаждением атмосферой (сечение Y) приравнивается температуре ведомого потока перед подогревом (сечение D); температура выхлопного газа перед смешением (сечение X) равна температуре атмосферы.

В размерных величинах соотношения имеют вид

$$\begin{aligned} R &= B(V_R - V_H), & E &= bC_p(T_\Gamma - T_K), \\ V_R^2/2 &= V_H^2/2 + (A + A^A)/B, \\ A &= E - bC_p(T_T - T_X), & A^A &= E^A - BC_p(T_R - T_H), \\ \oint \delta E/T &= bC_p[\ln(T_\Gamma/T_K) - \ln(T_T/T_X)] = 0, \\ \oint \delta E^A/T &= BC_p[\ln(T_P/T_D) - \ln(T_R/T_H)] = 0, \\ E^A &= BC_p(T_P - T_D) = bC_p(T_T - T_Y), \\ T_D &= T_Y, & T_X &= T_H \end{aligned}$$

где B – расход воздуха через воздухозаборник, A – расход полезной работы (мощность) цикла ведущего контура, b – расход газа через ведущий контур, E – расход тепловой энергии топлива, E^A – расход количества регенерируемого тепла, A^A – полезная мощность регенерационного цикла. В безразмерных величинах выражение тяги принимает вид

$$r = ((\theta_B - 1 + e - \mu(\theta_D + \theta_\Gamma/(\theta_D\theta_K) - 2))^{1/2} - v_H,$$

где $\mu = b/B$. Следует отметить: $B = B_{\text{ВРДрпп}}$ есть расход и газа через ВРД, и газа после смешения через внешний контур. Если $B_{\text{ТРДД}}$ – расход газа через внешний контур, $B_{\text{ТРДД}} = B_{\text{ВРДпп}}$, то $\mu = 1/m$, где m – степень двухконтурности ТРДД. Но суммарный расход через ТРДД есть $B_{\Sigma\text{ТРДД}} = B_{\text{ТРДД}}(1 + 1/m) > B_{\text{ВРДпп}}$, чем и обусловлен ввод обозначения « μ ».

Отмечаются позитивные аспекты преобразования разомкнутого внутреннего контура ТРДД в контур с циркулирующим газом.

1. Из сопоставления тяги оптимальной идеальной системы «ТРДД» (равенство скоростей истечения газов из сопел),

$$r_{\text{ТРДД}}^0 = [e + \theta_B - (m + \theta_\Gamma/(\theta_\Gamma - e))/(1 + m)]^{1/2} - v_H,$$

с тягой ВРДпп при $\theta_D = 1$ (нет регенерации),

$$r_{\text{ВРДпп}}(\theta_D = 1) = (\theta_B - 1 + e - \mu(\theta_\Gamma/\theta_K - 1))^{1/2} - v_H$$

следует: и тут тяга у ВРДрпп больше, чем у ТРДД.

2. В силу специфики вхождения μ в выражение θ_K минимально допустимая величина $\mu = \mu^m$ может быть заданной меньше величины $1/m^M$.

Множество вариантов в рамках «ВРДпп» с упрощениями условий смешения ограничиваются неравенствами

$$\begin{aligned} 0 \leq e \leq e^M, & \quad \mu^m = e/\theta_\Gamma + \varepsilon \leq \mu \leq 1, \\ 1 \leq \theta_B \leq \theta_K \leq \theta_\Gamma \leq \theta_\Gamma^M, & \quad 1 \leq \theta_D \leq \theta_K, \quad 1 \leq \theta_Y \leq \theta_\Gamma, \end{aligned}$$

где ε – малая положительная величина. Максимум тяги по переменным μ , θ_D достигается при

$$\mu^0 = 1, \quad \theta_D^0 = (\theta_\Gamma/\theta_K)^{1/2},$$

результат сравнения по тяге – $r_{\text{ВРДпп}}^0 > r_{\text{ТРДД}}^0$.

Подчеркиваются другие особенности приведенных описаний ВРДпп:

1. В оптимизационной задаче величина E зафиксирована.

2. Теоретически возможному повороту всего потока ($\mu = 1$) с промежуточным (но по конечному результату таким же, как и при истечении в атмосферу) охлаждением его через боковые стенки отвечает максимум количества утилизируемой теплоты.
3. Пусть значения b , E определены рациональностью функционирования камеры сгорания, они зафиксированы, уменьшение скорости истечения реактивной струи желательнее. Тогда уменьшение μ есть средство достижения желательной скорости истечения при увеличении значения абсолютной тяги.
4. При относительно больших значениях E регенерация оказывается действенным средством снижения относительного веса конструкции турбокомпрессора ВРДпп.

Заключение

Сформированы примерные модификации традиционных типов ТРД, ТРДД, ТРДФ. Подтипы, функционирование представлены идеальными термореактивными системами. Приняты условия формальных сопоставлений подтипов с прототипами – равенство расходов тепловой энергии топлива, равенство температур газов перед турбиной. При этих условиях критерии эффективности – тяга, удельная тяга ВРД. Исследованы основы изобарного теплообмена между зонами потоков внутри ВРД, отвода тепла в обтекающие боковые поверхности ВРД слои атмосферы. Основные результаты исследований:

- проектирование авиадвигателей с ориентацией на глубокое расширение и последующее изотермическое восстановление давления скоростной реактивной струи в ближайшем будущем бесперспективно;
- возможна реализация несколько вариантов регенерации разной степени интенсивности;
- в идеале изобарная регенерация отводимого тепла в одноконтурных подтипах не влияет на уровень термореактивной эффективности;
- эффект регенерации будет позитивным и в идеале, если основу функционирования представляют по крайней мере два цикла: высокотемпературный, тепловые отходы которого утилизируются, и низкотемпературный на утилизируемой тепловой энергии;
- несмотря на вывод части теплоты сжимаемого потока в атмосферу уровень термореактивной эффективности у подтипов с таким выводом выше, чем у прототипов, позволяет увеличить предельные возможности по тяге;

Следует ожидать: модификации с регенерацией как реальные изделия будут эффективнее прототипов лишь при относительно небольших потерях механической энергии в механизмах обеспечения процесса регенерации; усиления эффекта отвода тепла сжимаемого потока в атмосферу при организации отвода из нескольких ступеней компрессора.

Предложена схема ВРД с регенерационным петлевым потоком. Предварительные исследования показывают, у нее уровень термореактивной эффективности выше, чем у прототипа.

Литература

1. Акимов В.М., Бакулев В.И., Горбунов Г.М. и др. Теория воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1975.
2. Акимов В.М., Бакулев В.И., Курзинер Р.И. и др. Теория и расчет воздушно - реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1987.
3. Бакулев В.И., Голубев В.А., Крылов Б.А. и др. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. М.: МАИ, 2003.
4. Жуков А.Н. Авиационные двигатели: принципы формирования и моделирования виртуальных структур. М.: ВЦ РАН, 2013.