

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР**

СООБЩЕНИЯ ПО ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКЕ

А.Н. ЖУКОВ

**ВИРТУАЛЬНЫЕ ТАНДЕМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ
ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ АВИАЦИИ**

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ИМ. А.А. ДОРОДНИЦЫНА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
МОСКВА 2014

УДК 621.45:519. 816:629.782.03

Ответственный редактор
доктор физ.-матем. наук, чл.-корр. РАН
Ю.А. Флёров

Формируются подтипы воздушно-реактивного комплекса для сверхзвуковой авиации, названного **тандемом** авиационных двигателей. Исследуется специфика регулирования в сопоставлениях разновидностей виртуальных подтипов с прототипами. Показывается высокий уровень перспективности практической разработки.

Ключевые слова: **тандем** воздушно-реактивных двигателей, коррекция схемы прототипа, идеальная терморреактивная система, автоматическое регулирование, множество эффективных вариантов двигателя.

Рецензенты: *А.Б. Петровский,*
Л.Л. Вышинский

Научное издание

© Вычислительный центр им. А.А. Дородницына
Российской академии наук, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Формируются, исследуются возможности вариантов комплексного воздушно-реактивного двигателя (ВРД) названного *виртуальным тандемом двигателей*: два разнотипных ВРД установлены один за другим по движению газового потока. Возможны комплексы, в которых

первой (вспомогательной) составляющей являются типы «модификация винтомоторной установки, турбореактивный двигатель (ТРД) двухконтурный (ТРДД), ТРДД со смешением потоков (ТРДДсм)»,

второй (основной) составляющей - типы «ТРД с форсажной камерой сгорания (ТРДФ), ТРДДсм с форсажной камерой сгорания (ТРДДФсм)» [1 - 3].

Цели образования *тандемов*: формирование рационального остова ВРД с учетом ограничений взлетной тяги; существенное повышение интегральной эффективности функционирования сверхзвукового летательного аппарата (ЛА) в расширенном диапазоне по скорости полета увеличением возможностей системы автоматического регулирования. Предыдущие виртуальные подтипы ВРД [4 - 6] могут быть и альтернативой подтипам *тандема*, и составляющими *тандема*.

Исходная позиция формирований, исследований.

Скорость движения ЛА больше средней сверхзвуковой скорости. Силовая установка состоит из идентичных образцов ВРД, ее мощность – и основа обеспечения взлета, и обеспечение расчетной скорости движения ЛА.

Аэродинамическое сопротивление ЛА максимально в доминантных условиях проекта. Желателен образец ВРД, функционирующий оптимально именно в этих условиях.

Площади протока газа в турбокомпрессоре газотурбинного двигателя - нерегулируемые.

Прототипом основной составляющей *тандема* полагается ТРДФ. Отмечается специфика формирования его остова, функционирования вне *тандема*.

Локально-оптимальный представитель ТРДФ – это вариант, который

- 1) по критериям *термореактивной эффективности* функционирует оптимально;
- 2) имеет проектную плотность тока на входе в компрессор как можно более близкую к единице: → габариты и составляющая в аэродинамическом сопротивлении ЛА - минимальные, вес ТРДФ – минимальный.

Поскольку плотность тока на входе в компрессор – возрастающая функция от *физического* числа оборотов ротора, то ТРДФ, остов которого сформирован по условиям оптимального функционирования в доминантной точке проекта ЛА, приходится регулировать законом неизменности *приведенного* числа оборотов ротора во всем диапазоне по температуре торможения набегающего потока. В текущей точке диапазона закон обеспечивает максимум расхода воздуха через ТРДФ, но температура газов в турбокомпрессоре уменьшается во столько раз, во сколько раз уменьшается проектная температура торможения набегающего потока. При большой проектной скорости такой вариант не может обеспечить взлет.

Введенный близ проектной скорости под-диапазон, в котором ТРДФ регулируется законом неизменности температуры газа перед турбиной, позволяет обеспечить взлет ЛА. Однако, чем больше под-диапазон, тем быстрее уменьшается расход воздуха через ТРДФ по сравнению с максимально возможным расходом. Регулирование законом неизменности температуры газа перед турбиной (числа оборотов ротора) – существенный негативный фактор эффективности в доминантной точке функционирования.

Основное назначение первой составляющей *тандема* – нивелирование негативных факторов регулирования ТРДФ.

Теоретически возможны такие компоновки *тандема*, такое их функционирование, что в окрестности доминантной точки первая составляющая не функционирует. *Тандем*

будет не оптимальным по критерию веса, но *интегральная* эффективность движений у ЛА с *тандемом* будет выше, чем у ЛА с ТРДФ.

Формируются *танделы* с функционирующей первой составляющей в доминантной точке проекта. Одно из важных условий рациональности *тандела* – уровень локальной эффективности у *тандела* выше, чем у прототипа второй составляющей.

Тяга, импульс тяги по тепловой энергии топлива – основные критерии совершенства ВРД. В настоящее время, в силу возрастания приоритета критерия экологии авиации, их значимость возросла, рациональными вариантами *тандела* признаются и те, у которых уровень весового, габаритного совершенства несколько ниже, чем у прототипа второй составляющей.

В сфере теоретико-эвристической генерации структур рассматриваются максимальные режимы функционирования, остовы *тандела* формируются без учета ограничений, налагаемых на состояния газо-воздушного потока воздухозаборником. В формальных оценках множество допустимых внешних условий функционирования аппроксимирует диапазон по температуре торможения набегающего потока в фиксированном слое атмосферы, условия взлета аппроксимирует точка с нулевой скоростью движения. «Глобальную» эффективность (глобальную в рамках концепции проекта ЛА) представляют локальная эффективность *тандела* в точке взлета и в доминантной точке проекта.

1. Уточнения априорных представлений в примерах

1.1. Первые подтипы *тандела*, предварения к формам программ регулирования

Принимается: ТРДФ может регулироваться комбинированной программой регулирования, внутри проектного диапазона возможна точка переключения между условиями неизменности числа оборотов, приведенного числа оборотов ротора турбокомпрессора; в регулировании ротора вспомогательного двигателя также возможна точка переключения между такими же условиями и ее координаты могут быть иными.

В исходном, 0-м подтипе *тандела* вспомогательный двигатель – модифицированная винтомоторная установка с винтом, трансформированным в вентилятор значительной степени двухконтурности (рис. 1). Отмечаются кардинальные аспекты проекта.

- В доминантной точке функционирования уровень термореактивной эффективности *тандела* повысится вследствие распределения расхода тепловой энергии топлива по камерам сгорания ТРДФ, мотора и большей максимально допустимой температуре газа в емкости с поршнем.

- Желательный вариант регулирования ТРДФ – неизменность приведенного числа оборотов ротора во всем проектном диапазоне. В этом случае агрегированное регулирование в *танделе* корректируется *лишь перестановкой датчика температуры*, по значениям которой изменяется расход топлива в основной камере сгорания: измеряется температура торможения потока на выходе из связки «мотор + вентилятор». Коррекция допустима: подобие по местному числу Маха газового потока, допустимость автономного вращения роторов – основы построений ВРД. Не исключено, при детализации регулирования потребуется измерять и давление.

- Пусть ротор вентилятора регулируется законом неизменности приведенного числа оборотов. Опыты формирования виртуальных подтипов показывают: из малого повышения уровня локальной эффективности в проектной точке вытекает несколько большее повышение уровня этой эффективности при приведении подтипов в условия взлета.



- Применение регуляции связки «мотор + вентилятор» условием неизменности числа оборотов (неизменность температуры газа в конце подвода тепла в емкости) на проектном диапазоне в сфере формирования структур означает формирование его остова в точке старта. Качество зависимостей величин процесса от температуры торможения набегающего потока определяется структурой двухконтурных типов: 1) давление, температура воздуха в емкости перед подводом теплоты увеличиваются, удельный расход топлива уменьшается; 2) осредненная относительная плотность тока на входе в емкость максимальна в точке взлета и минимальна в проектной точке; 3) степень повышения давления в вентиляторе максимальна в точке взлета и минимальна в проектной точке. В результате: позитивное влияние связки на тягу ТРДФ ожидается минимальным в проектной точке и максимальным при взлете; уровень эффективности связки как регулятора состояний функционирования ТРДФ ожидается предельно высоким.

Очевидно, уточненные концепции проекта ЛА будут определять рациональные программы регулирования *тандема*. Например, возможны такие варианты.

1. Эффективность функционирования в доминантной точке приоритетна: остов *тандема* в целом формируется по условию оптимальности функционирования в этой точке.
2. При неизменности приведенного числа оборотов ротора ТРДФ в проектном диапазоне требуется эффективное обеспечение взлета. В этом случае в проектной точке величины состояния функционирования вспомогательного двигателя могут быть параметрами частной оптимизационной задачи, остов ТРДФ формируется по условию оптимальности функционирования *тандема* в проектной точке. В точке взлета величины состояния функционирования ТРДФ могут быть параметрами другой частной оптимизационной задачи, остов вспомогательного двигателя формируется по условию максимальной плотности давления газа перед ТРДФ.
3. Приоритетно обеспечение расширенного диапазона по продольной маневренности ЛА при средних значениях температуры торможения набегающего потока, во вспомогательном двигателе нежелательно существенное отклонение текущих величин от допустимых максимальных значений. В таком случае остов вспомогательного двигателя целесообразно формировать при среднем значении температуры торможения набегающего потока, при малых значениях регулировать его законом неизменности приведенного числа оборотов ротора.
4. Приоритетна интегральная эффективность функционирования в проектном диапазоне *тандема*. В таком случае в аппроксимации интегральной эффективности задается ряд контрольных точек, разрабатываются алгоритм формирования остова и программа регулирования. Остов вспомогательного двигателя может формироваться фрагментарно: оптимальные значения термодинамических величин мотора - определяться в J-й контрольной точке, расчетные значения относительной плотности тока, число оборотов ротора мотора – задаваться в J+1-й контрольной точке, и т.д.

Отмечается специфика некоторых возможных коррекций структуры.

Возможно смещение выхлопного газа мотора с основным потоком перед вентилятором и за вентилятором. Можно ожидать: при равенстве давлений смешиваемых потоков, при относительно небольшом отклонении процесса расширения газа от изоэнтропийного процесса работа мотора по первому варианту будет больше, чем по второму варианту; температура торможения потока перед ТРДФ будет слабо зависеть от условий выхлопа в окрестности вентилятора.

Можно соединить роторы регулируемой муфтой. Ввод дополнительного регулирующего фактора – распределения энергии между роторами - повысит эффективность программы регулирования *тандема*.

Кроме относительно слабого корректирования *тандем* может быть преобразован в подтипы с тандемной основой более ощутимым изменением схемы течений потоков. Например, газ мотора смешивается с потоком основного двигателя в сопле, выводится через специальное сопло, выводится в поток между турбиной и форсажной камерой основ-

ного двигателя. У каждого из вариантов имеются свои позитивные, негативные аспекты. В частности, смешение потоков за турбиной (рис. 2) позитивно, так как поток перед ТРДФ не подогревается продуктами сгорания из мотора - уменьшаются габариты и вес турбокомпрессора, оно негативно, так как ограничиваются возможности дополнительного поджатия потока перед ТРДФ, ввод канала с надежной термоизоляцией увеличивает вес конструкции. Варианты нуждаются в оценках их влияний на регулирование воздухозаборника.

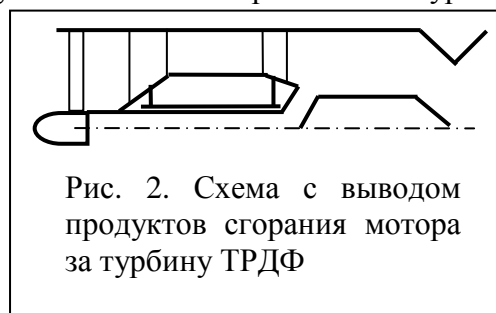


Рис. 2. Схема с выводом продуктов сгорания мотора за турбину ТРДФ

Отмечаются значительные коррекции 0-го подтипа *тандема* - далее он обозначается ТВРД0 - преобразования в подтипы ТВРД№, № = 1,2 вводом иных типов ВРД в *тандем*: преобразование «ТВРД0 → ТВРД1» заключается в замене типа «ТРДФ» типом «ТРДДФсм», трансформация «ТВРД0 → ТВРД2» - в замене связки «мотор + вентилятор» подтипом «ТРДДсм с передним расположением вентилятора».

Предварительные оценки возможностей ТВРД2 указывают на целесообразность перестановки, трансформации подсистем традиционного ТРДДсм, формировании подтипа «ТВРД3». Оценками перспектив его построений выражается уровень перспектив допустимых подтипов *тандема*.

В рис. 3 изображена схема подтипа «ТРДДсм с автономным турбовентилятором (ТРДДсм1)», являющаяся по позиции вентилятора известной модификацией ТРДД. Основные требования, предъявляемые к ТРДДсм1 как к эффективному регулятору состояния газа перед ТРДФ:

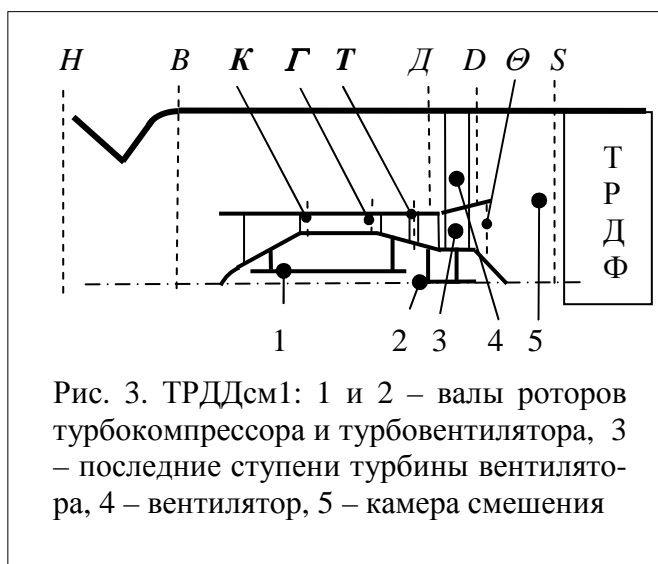


Рис. 3. ТРДДсм1: 1 и 2 – валы роторов турбокомпрессора и турбовентилятора, 3 – последние ступени турбины вентилятора, 4 – вентилятор, 5 – камера смешения

за ТРДДсм1 не допускается разгон потока до звуковой скорости; обеспечение равенства давлений газов смешиваемых потоков во всем диапазоне по температуре торможения набегающего потока.

Конструктивно требуемая регуляция может быть достигнута обеспечением варьирования положений лопаток вентилятора, например, связкой лопаток турбины, вентилятора стержнями.

Отмечаются другие аспекты подтипа «ТРДДсм с автономным турбовентилятором», указывающие на значительное повышение его эффективности как составной части системы автоматического регулирования *тандема*.

- ⊙ Качество зависимостей газодинамических величин процесса от кинетической энергии набегающего потока будет таким же, как и у ТРДДсм, связки «мотор + вентилятор».
- ⊙ При значительной энергии набегающего потока сжатие воздуха в компрессоре приемлемо без вспомогательного поджатия в вентиляторе.
- ⊙ С перестановкой вентилятора исключается сложное влияние на характеристики его турбокомпрессора. Термином «автономный турбовентилятор» отмечается единственность связи между турбокомпрессором и турбовентилятором - состояние газа на выходе из турбокомпрессора есть состояние газа на входе в турбину турбовентилятора.
- ⊙ В осевом компрессоре, вентиляторе традиционного ВРД основное назначение направляющего, спрямляющих аппаратов ступеней – увеличение степени повышения давления воздуха в ступенях, уменьшение габаритов, веса лопаточных машин. В образцах ТРДДсм и по причине использования их в качестве маршевых двигателей дозвуковой авиации, и в силу специфики положения вентилятора углы атаки воздушным потоком

лопаток рабочих колес - элементов ротора вентилятора – как правило, не регулируются. Поворот лопаток спрямляющих аппаратов – элементов статора вентилятора рассматривается как сугубо вспомогательное средство регуляции газодинамического процесса. Их поворот может быть и средством увеличения расхода воздуха (степень повышения давления уменьшается), и средством повышения давления (расход воздуха уменьшается). Цель преобразования «ТРДДсм → ТРДДсм1» заключается в повышении эффективности регулирования поворотом лопаток вентилятора. Лопатки вентилятора ТРДДсм1 могут быть элементами двойного назначения.

- ⊙ Углы атаки воздушным потоком лопаток - элементов ротора вентилятора могут регулироваться аналогично регуляции лопастей винта. Следует ожидать, совместное регулирование *всех* лопаток значительно расширит пределы активного воздействия на состояние потока за вентилятором. В агрегированной модели допустимо толкование: лопатки – элементы статора регулируются с целью изменения расхода воздуха и относительной плотности тока, лопатки – элементы ротора – с целью изменения степени повышения давления. В измененных обстоятельствах контроль относительной плотности тока на входе в вентилятор и числа оборотов ротора турбовентилятора могут иметь второстепенное значение, первостепенным оказывается контроль обеспечения расхода газа, задаваемого функционированием собственно ТРДФ.
- ⊙ Автономный вход составляющих общего потока увеличивает состав основных аргументов формирования остова величинами: расчетная относительная плотность тока на входе в вентилятор, расчетная скорость вращения ротора турбовентилятора
- ⊙ В силу существенного уменьшения температуры газа в последних ступенях турбины вентилятора возможна надежная регуляция лопаток в последней ступени турбины. В агрегированных представлениях это регулирование можно толковать как средство обеспечения равенства давления газов в смешиваемых потоках.
- ⊙ Расширяются пределы варьирования по скорости вращения ротора турбовентилятора.

1.2. Специфика форм регулирования

Форма воздействия на величины ТРДФ в *тандеме* законом неизменности приведенного числа оборотов ротора принимает вид

$$n_{np} = const = n_{np}^{\omega} \rightarrow (n/(T_S)^{1/2}, T_I/T_S) = const = (n^{\omega}/(T_S^{\omega})^{1/2}, T_I^{\omega}/T_S^{\omega}),$$

где n и n_{np} – физическое и приведенное число оборотов ротора турбокомпрессора, ω – индекс величин в доминантной точке функционирования, T – температура, s – индекс состояния заторможенного перед ТРДФ потока (рис. 3), $i=k, l, T$ – индексы состояний газов соответственно перед основной камерой сгорания, турбиной, форсажной камерой сгорания, n_{np}^{ω} – расчетное (проектное максимальное) значение в характеристике компрессора, T_I^{ω} , T_S^{ω} – расчетные максимальные значения температур.

Расход воздуха через ТРДФ в *тандеме* выражается в виде

$$B_S = q_s F_s p_s / (T_S)^{1/2} \hat{C},$$

где B – расход, q – относительная плотность тока, F – площадь протока, p – давление, s – индекс минимальной площади потока при входе в компрессор, \hat{C} – константа в переменных состояниях функционирования ВРД.

Форма регулирования ТРДФ вне *тандема*, выражение расхода воздуха через него получается заменой индексов s, s на B, e – индексы состояний набегающего воздушного потока на ТРДДсм1 в *тандеме*, индекс e – индекс части потока, втекающего в компрессор ТРДДсм1. Во избежание двойственного толкования обозначений вводятся индексы B^*, e^* – индексы состояний набегающего воздушного потока на ТРДФ *вне тандема*.

В виртуальной реальности преобразования будут позитивными, если

$$T_B \in [T_H, T_B^{\omega}] \rightarrow p_s/p_B > 1,$$

величина T_S – возрастающая функция от T_B , такая, что

$$T_S^{\omega} - T_S^m < T_B^{\omega} - T_H,$$

где m – индекс минимального значения величины. При прочих равных условиях

$$B_S/B_{B^*} = p_S/p_{B^*} (T_{B^*}/T_S)^{1/2} > 1,$$

т.е., можно ожидать, абсолютная тяга *тандема* увеличится не только из-за увеличения удельной тяги, но и из-за увеличения расхода воздуха.

Кардинальное условие регулирования турбокомпрессора ТРДДсм1 в *тандеме* представляется в виде

$$n_1 = const = n_1^\alpha = n_1^M \rightarrow T_\Gamma = const = T_\Gamma^M,$$

где n_1 – число оборотов ротора турбокомпрессора, M – индекс максимального значения величины, α – индекс величин в точке старта ЛА, Γ – индекс состояния газа перед турбиной ТРДДсм1 (рис.3). При принятых ограничениях диапазона функционирования приведенное число оборотов ротора системой регулирования не контролируется, условие

$$T_B \in [T_H, T_B^\omega] \rightarrow n_{1np} \leq n_{1np}^M$$

выполняется выбором: $T_B = T_H \rightarrow n_{1np} = n_{1np}^M$.

В агрегированной модели турбовентилятор полагается агрегатом, обеспечивающим расход газа, задаваемый функционированием ТРДФ и оптимальное смешение потоков на выходе из ТРДДсм1. Отмечены следующие возможности воздействия: варьирование скорости вращения ротора, площади протока в направляющих аппаратах ступеней вентилятора, площади протока через вращающиеся лопатки ротора вентилятора, площади протока в направляющем аппарате последней ступени турбины вентилятора. В сфере формирования структур они представляются двумя регулирующими факторами. Желательный вариант программы регулирования ТРДДсм1 в *тандеме* выражается в виде

$$T_B \in [T_H, T_B^\omega], (E_\Gamma, F_d, \chi) = var \Rightarrow (T_\Gamma, B_S/B_s', p_D/p_\partial) = const = (T_\Gamma^M, 1, 1),$$

где E – расход тепловой энергии топлива, d – индекс критического сечения в рабочем колесе вентилятора, F_d – регулирующий фактор-обобщение площадей протока в вентиляторе, B_S – тот расход, который определяется конструкцией и функционированием ТРДДсм1,

$$B_S = B_s + B_\partial,$$

∂ – индекс критического сечения в рабочем колесе вентилятора, B_s' – расход через ТРДФ без учета возможного ограничения пропускной способности ТРДДсм1, χ – регулирующий фактор-обобщение углов атаки лопаток и скорости вращения ротора, активно изменяющих давление газов в турбовентиляторе. При детализации программы целесообразно дополнительное регулирование потенциальными регулирующими факторами по условию минимизации потерь механической энергии потоков в турбовентиляторе.

Агрегированной программой не контролируются важные ограничения степени двухконтурности, скорости вращения ротора турбовентилятора. Они, как и скорость вращения ротора турбокомпрессора, удовлетворяются выбором значения $T_B = T_{B\beta}$ при котором степень двухконтурности равна предельно допустимому значению, $T_B = T_{B2}$ при котором скорость вращения ротора турбовентилятора равна предельно допустимому значению:

$$T_{B\beta}, T_{B2}, T_B \in [T_H, T_B^\omega] \rightarrow \beta \leq \beta^M(T_{B\beta}), n_2 \leq n_2^M(T_{B2}),$$

где β – отношение расхода газа через турбину к расходу воздуха через ТРДДсм1, n_2 – число оборотов ротора турбовентилятора,

$$m = B_\partial/B_s = (1 - \beta)/\beta,$$

m – степень двухконтурности.

Следует ожидать:

$$T_B = T_H \rightarrow \beta = \beta^M, n_2 = n_2^M,$$

$$T_B = T_B^\omega \rightarrow \beta = \beta^m, n_2 = n_2^m.$$

2. Модель функционирования, формальные оценки примерного варианта тандема

Описывается *тандем* подтипа «ТВРДЗ». В процедурах сравнений основная концепция проекта:

в доминантной точке формируется остов ТРДФ по условиям оптимального функционирования при фиксированном состоянии потока за ТРДДсм1;

в проектном диапазоне функционирования приведенное число оборотов ротора ТРДФ неизменно;

в точке взлета формируется остов ТРДДсм1 по условию максимальности давления в потоке перед ТРДФ;

в проектном диапазоне число оборотов ротора турбокомпрессора ТРДДсм1 неизменно, это условие определяет состояние потока за ТРДДсм1 в доминантной точке.

2.1. Основные соотношения, оптимизация в проектной точке функционирования

Принимаются обозначения:

$R, E_i, V_i, T_i, B_i, F_i, p_i, q_i, c_p$ – соответственно тяга, расход тепловой энергии топлива, скорость, абсолютная температура, расход газа, площадь протока, давление, относительная плотность тока, удельная теплоемкость газа при постоянном давлении,

$v, k, \Gamma, T, D, \Theta, S$ – индексы заторможенных потоков в ТРДДсм1 (рис. 3),

$H, \delta, d, z, s, z, \phi, C$ – индексы состояний потоков в движении, δ – на входе в компрессор ТРДДсм1, d – на входе в вентилятор, d – критического сечения в рабочем колесе вентилятора, z – на входе в турбину ТРДДсм1, s – на входе в компрессор ТРДФ, z – на входе в турбину ТРДФ, ϕ – критического сечения в сопле ТРДФ,

k, Γ, T, ϕ – индексы состояний заторможенного потока в ТРДФ (рис. 4).

Составляющая концепции относительно ТРДФ «в проектной точке фиксируется состояние потока за ТРДДсм1, остов ТРДФ определяется условием оптимального функционирования» позволяет отложить моделирование связей между величинами состояния потока перед ТРДФ, полагать: величины потока перед ТРДФ в *тандеме* являются величинами внешних условий его функционирования, функционирование ТРДДсм1, корректирующее состояние потока перед ТРДФ, можно выразить элементарным условным циклом. Именно, в сфере теоретико-эвристических формирований структур основа функционирования представляется неоптимальным циклом «ТРДу», в котором поток сжат в изоэнтروпийном процессе до температуры T_D и затем изобарно подогрет до T_S . Эта условность означает равенство давлений потоков в смешении,

$$p_D = p_\Theta = p_S.$$

Уравнения тяги, расходов газа и тепловой энергии ТВРДЗ, баланса работ лопаточных машин ТРДФ представляются в виде

$$\begin{aligned} B_C &= B_S = B_H, \\ E_S &= c_p B_H (T_S - T_D), \\ E_{\text{ТРДФ}} &= E_\Gamma + E_\Phi = c_p B_H (T_\Gamma - T_K + T_\Phi - T_T), \\ R &= B_H (V_C - V_H) = B_H \{ [2c_p (T_\Phi - T_C)]^{1/2} - [2c_p (T_B - T_H)]^{1/2} \}, \\ T_K - T_S &= T_\Gamma - T_T. \end{aligned}$$

Обратимость *составного* цикла *тандема* выражается в виде

$$(\oint \delta E/T)_{\text{ТВРДЗ}} = 0 \Rightarrow (T_D/T_H)(T_K/T_S) = (T_\Gamma/T_T)(T_\Phi/T_C),$$

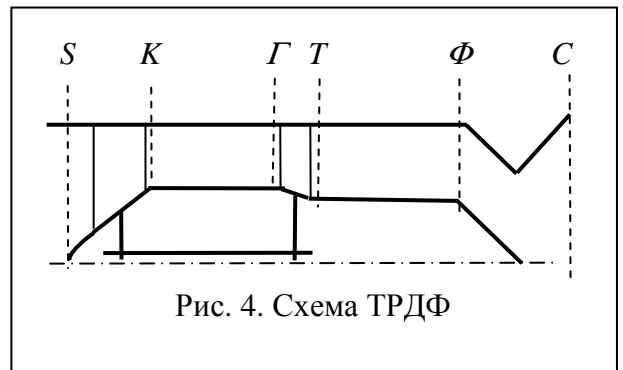


Рис. 4. Схема ТРДФ

где δE - элементарное приращение тепловой энергии в круговом процессе.

Составной цикл *тандема* показан в рис. 5 (S - энтропия, \mathcal{Z} - обозначение состояния потока, расширенного из состояния S в состояние с атмосферным давлением). Тут относительно небольшой расход тепловой энергии в ТРДДсм1, специфика концепции проекта позволяют выразить суть общего процесса относительно слабой коррекцией традиционного цикла ТРДФ, а функционирование *тандема* обозначать функционированием ТРДФ в тандеме.

На величины налагаются ограничения-неравенства:

$$\begin{aligned} E_G, E_\Phi > 0, 0 < B_H \\ T_H \leq T_B < T_D < T_S < T_K < T_G \leq T_G^M, \\ T_T \leq T_\Phi \leq T_\Phi^M, \end{aligned}$$

где принято, что установка ТРДФ в *тандем* не влияет на его максимально допустимые значения температур.

Система соотношений будет описывать функционирование ТРДФ вне *тандема*, если положить $T_B = T_D = T_S$, величины пометить индексом, указывающим на прототип.

Вводятся безразмерные величины: $r_{y\delta}$ - удельная тяга, v_j - скорость, θ_j - температура, e_j - расход тепловой энергии топлива. Величины связываются формулами

$$\begin{aligned} R = r_{y\delta}(2c_p T_H)^{1/2} B_H, \quad V_j = v_j(2c_p T_H)^{1/2}, \\ T_i = \theta_i T_H, \quad E_i = e_i c_p T_H B_H. \end{aligned}$$

Соотношения идеальной терморреактивной системы принимают вид

$$\begin{aligned} r_{y\delta} &= v_C - v_H = (\theta_\Phi - \theta_C)^{1/2} - (\theta_B - 1)^{1/2}, \\ e_G + e_\Phi &= \theta_G - \theta_K + \theta_\Phi - \theta_T, \\ \theta_K - \theta_S &= \theta_G - \theta_T, \\ \theta_D \theta_K / \theta_S - (\theta_T / \theta_T)(\theta_\Phi / \theta_C) &= 0, \\ e_i > 0, \quad 1 \leq \theta_B < \theta_D < \theta_S < \theta_K < \theta_G \leq \theta_G^M, \\ \theta_T &\leq \theta_\Phi \leq \theta_\Phi^M. \end{aligned}$$

В задаче определения оптимальной термодинамической основы величины классифицируются следующим образом: $r_{y\delta}$ - единый критерий; α - вектор параметров задачи (параметров семейства локально-оптимальных представителей подтипа «ТРДФ в тандеме»), $\alpha = (\theta_B, \theta_D, \theta_S, \theta_G^M, \theta_\Phi^M)$; x - вектор переменных, $x = (e, \theta_K, \theta_G, \theta_T, \theta_\Phi, \theta_C)$. Ставится задача: найти

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

где X - множество допустимых значений x , задаваемое приведенными выше ограничениями-неравенствами.

Задача разрешается явно методом исключения зависимых переменных. Величины $\theta_K, \theta_G, \theta_\Phi$ полагаются независимыми переменными. С исключением θ_C, θ_T соответствующими подстановками выражение тяги преобразуется к виду

$$r_{y\delta} = [\theta_\Phi(1 - \theta_S \theta_T / (\theta_D \theta_K (\theta_G - \theta_K + \theta_S)))]^{1/2} - (\theta_B - 1)^{1/2}.$$

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

$$\begin{aligned} \theta_G = \theta_G^0 = \theta_G^M, \quad \theta_\Phi = \theta_\Phi^0 = \theta_\Phi^M, \\ \theta_K = \theta_T = \theta_K^0 = \theta_T^0 = (\theta_G + \theta_S)/2, \end{aligned}$$

где индексом 0 помечены оптимальные величины.

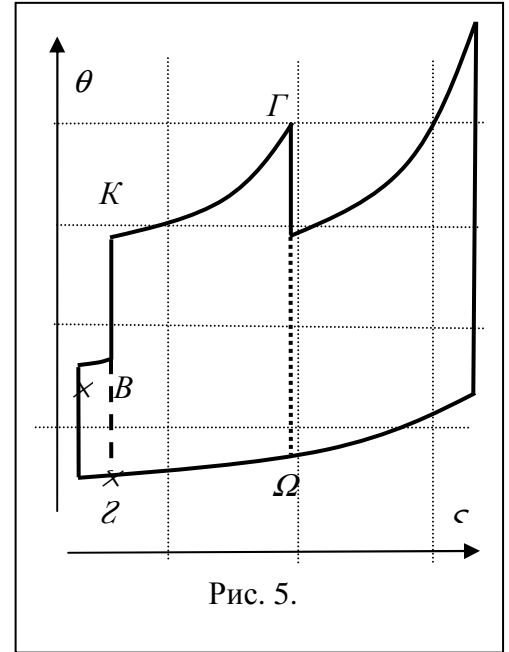


Рис. 5.

Задаются величины относительной плотности тока на входе в компрессор, число оборотов ротора по условию минимизации лобовой площади остова,

$$q_s = q_s^0 = q_s^M, \quad n = n^0 = n^M.$$

Отмечается специфика преобразования «ТРДФ вне *тандема* → ТРДФ в *тандеме*» при условии не связанности параметров θ_D , θ_S :

- * По параметру θ_D удельная тяга – возрастающая функция.
- * По параметру θ_S удельная тяга – убывающая функция.
- * Множество допустимых значений (θ_S , θ_D) составляют два не пустых подмножества: то, на котором значения тяги прототипа меньше - равны значениям тяги ТРДФ в *тандеме*, и то, на котором значения тяги прототипа больше - равны значениям тяги ТРДФ в *тандеме*. Из равенства

$$r_{y\partial}^0 = r_{y\partial\text{ТРДФ}^*}^0,$$

где * - индекс прототипа, функционирующего вне тандема, выводится уравнение границы между подмножествами (линейное по θ_D и квадратичное по θ_S).

В заключение подчеркиваются условия формирования остова *тандема*:

$$\begin{aligned} \theta_T^\omega &= \theta_T^0 = \theta_T^M, \quad \theta_\Phi^\omega = \theta_\Phi^0 = \theta_\Phi^M, \\ \theta_K^\omega &= \theta_T^\omega = \theta_K^0 = \theta_T^0 = (\theta_T + \theta_S)/2, \\ q_s^\omega &= q_s^0 = q_s^M, \quad n^\omega = n^0 = n^M, \end{aligned}$$

значения ($\theta_S = \theta_S^\omega$, $\theta_D = \theta_D^\omega$) определяются формированием остова ТРДДсм1, приведением его программой регулирования в точку ω .

2.4. Вариант регулирования основного двигателя в *тандеме*

Задается программа регулирования ТРДФ в *тандеме*:

$$\theta_S \in [\theta_S^m, \theta_S^\omega], \quad (e_T, e_\Phi, F_\Phi) = \text{var} \Rightarrow (\theta_T/\theta_S, \theta_\Phi) = \text{const} = (\theta_T^\omega/\theta_S^\omega, \theta_\Phi^\omega, \Sigma a),$$

где подобные температуры $\theta_{I=K,T} = \theta_S \theta_I^\omega / \theta_S^\omega$, Σa – суммарная работа лопаточных машин ТРДФ. В формируемом варианте для расчета характеристик ТРДДсм1 внутри проектного диапазона достаточно условий

$$(q_s, F_s) = \text{const} = (q_s, F_s)^\omega.$$

2.3. Вспомогательный двигатель: оптимизация в точке взлета

Энергетические связи величин идеального процесса в ТРДДсм1 принимают вид:

$$\begin{aligned} e_T &= \beta(\theta_T - \theta_K), \\ (1 - \beta)\theta_D + \beta\theta_\Theta &= \theta_S, \\ \theta_K - \theta_B &= \theta_T - \theta_T, \\ (1 - \beta)(\theta_D - \theta_B) &= \beta(\theta_T - \theta_\Theta), \end{aligned}$$

частный случай – равенство давлений заторможенных потоков на выходе из турбовентилятора – в температурах выражается в виде

$$\theta_D = \theta_K \theta_\Theta / \theta_T.$$

Фиксация составляющей концепции относительно ТРДДсм1 - «в точке взлета эффективность *тандема* обеспечивается формированием остова ТРДДсм1 по условию максимальности давления в газовом потоке перед ТРДФ» - позволяет формировать этот остов независимо от состояния функционирования *тандема* в проектной точке и независимо от состояния функционирования ТРДФ в точке взлета. При формировании остова термодинамические величины не зависят от корректив «ТРДДсм → ТРДДсм1», в определении оптимальных значений термодинамических величин условие максимальности давления в газовом потоке перед ТРДФ равносильно условию максимальности тяги ТРДДсм1 вне *тандема*. Т.е., применима оптимизация термореактивной системы по [6], откуда:

степень двухконтурности (или β) - параметр оптимизационной задачи,

$$\begin{aligned} \theta_T^\alpha &= \theta_T^0 = \theta_T^M, \quad \theta_K^\alpha = \theta_K^0 = (\theta_T^M)^{1/2}, \\ (p_D/p_\Theta = p_D/p_S)^0 &= 1, \end{aligned}$$

где точку взлета при формировании структур, как было отмечено во введении, аппроксимирует нулевая скорость набегающего потока фиксированном слое атмосферы.

Отмечается специфика формирования остова в целом: относительные плотности тока на входе в лопаточные машины, скорости вращения роторов определяются условием минимизации лобовой площади остова,

$$q_e^\alpha = q_e^0 = q_e^M, \quad q_d^\alpha = q_d^0 = q_d^M, \\ n_1^\alpha = n_1^0 = n_1^M, \quad n_2^\alpha = n_2^0 = n_2^M;$$

параметр оптимизационной задачи $\beta = \beta^\alpha$ задается в рамках ограничений концепции проекта ЛА;

связанность величин θ_D, θ_S можно обозначить в виде

$$\theta_D = \theta_D(\beta^\alpha), \quad \theta_S = \theta_S(\beta^\alpha).$$

2.4. Регулирование вспомогательного двигателя, расчет при приведении в текущую точку функционирования

Задается программа регулирования

$$\theta_B \in [1, \theta_B^\omega], \quad (e_T, F_d, \chi) = \text{var} \Rightarrow (\theta_T, B_S/B_S', p_D/p_\theta) = \text{const} = (\theta_T^\alpha, 1, 1).$$

С перестановкой вентилятора упрощаются связи между величинами процессов в турбокомпрессоре ТРДДсм1. При $\theta_T = \text{const} = \theta_T^\alpha$ они определяются условием неизменности удельной работы сжатия газа в компрессоре ($\theta_K - \theta_B = \theta_K^\alpha - 1$), неизменностью относительной плотности тока на входе в турбину ($q_z = q_z^\alpha$), равенством расхода воздуха на входе в компрессор расходу газа на входе в турбину ($B_e = B_z$), изоэнтропийным сжатием воздуха ($p_K/p_B = (\theta_K/\theta_B)^{k/(k-1)}$), изобарным подводом тепла ($p_K = p_T$),

$$q_e = q_z(F_z/F_e)(p_T/p_B)(\theta_B/\theta_T)^{1/2}, \quad q_e^\alpha = q_z(F_z/F_e)(p_T/p_B)^\alpha(1/\theta_T)^{1/2},$$

$$\downarrow \\ q_e/q_e^\alpha = ((\theta_K/\theta_B)/\theta_K^\alpha)^{k/(k-1)}(\theta_B)^{1/2},$$

где k – показатель адиабаты.

Порядок расчета величин процесса в текущей точке диапазона $[1, \theta_B^\omega]$: по значениям величин, описывающих остов, регулирование ТРДДсм1 вычисляются

$$\theta_K = \theta_K^\alpha + \theta_B - 1, \quad \theta_T = \theta_T - \theta_K + \theta_B, \quad q_e = q_e^\alpha((\theta_K/\theta_B)/\theta_K^\alpha)^{k/(k-1)}(\theta_B)^{1/2}, \\ B_i = q_i F_i p_i / T_i^{1/2} \hat{C}, \quad (i, l) = (e, B);$$

по значениям величин, описывающих остов, регулирование ТРДДсм1, ТРДФ, решением системы уравнений

$$p_l/p_J = (\theta_l/\theta_J)^{k/(k-1)}, \quad (l, J) = (D, B), (\theta, T), \quad p_D = p_\theta = p_S, \\ (1 - \beta)(\theta_D - \theta_B) = \beta(\theta_T - \theta_\theta), \\ \theta_S = (1 - \beta)\theta_D + \beta\theta_\theta, \quad \beta = B_\theta/B_S', \\ B_H = B_S = B_i = q_i F_i p_i / T_i^{1/2} \hat{C}, \quad (i, l) = (s, S)$$

вычисляются остальные величины процесса.

Подчеркивается качество расходных, энергетических характеристик ТРДДсм1, результирующее влияние на функционирование ТРДФ:

$q_e = q_e(\theta_B)$ - строго убывающая функция, при $\theta_T = 8$, $\theta_B^\omega = 3$ значение q_e^α уменьшается более чем в 2,5 раза [4];

$e_T(\theta_B)$, $\beta(\theta_B)$, $\theta_S(\theta_B)/\theta_B$, $\theta_D(\theta_B)/\theta_B$ - строго убывающие функции;

при $\theta_B \rightarrow \theta_B^\omega$ состояние потока перед ТРДФ в *тандеме* приближается к состоянию потока ТРДФ вне *тандема*.

Утверждается:

⚡ В отвлечении от связи величин θ_S, θ_D в любой точке функционирования множество допустимых значений $(\theta_S, \theta_D) \in [\theta_D^m, \theta_D^\omega] \times [\theta_S^m, \theta_S^\omega]$ в идеале составляют два не пустых подмножества: то, на котором значения тяги прототипа меньше - равны значениям тяги ТРДФ в *тандеме*, и то, на котором значения тяги прототипа больше - равны значениям тяги ТРДФ в *тандеме*.

⇒ Способ преобразования тепловой энергии в механическую энергию, содержательность ограничений величин, обобщенный опыт двигателестроения в качестве основы коррекций структур доказывают: и в предельных абстракциях, и в более точных аппроксимациях максимальных режимов $\forall \theta_B \in [1, \theta_B^{\omega}]$

$$\begin{aligned} & \downarrow \\ 1 & < \theta_D^m, \theta_B^{\omega} < \theta_D^{\omega}, \theta_D^m < \theta_S^m, \theta_B^{\omega} < \theta_S^{\omega}, \theta_D^{\alpha} = \theta_D^m < \theta_D^{\omega}, \\ & \theta_D^{\omega} - \theta_D^m < \theta_B^{\omega} - 1, \theta_S^{\omega} - \theta_S^m < \theta_B^{\omega} - 1, \end{aligned}$$

связанные приведенными выше соотношениями значения (θ_D, θ_S) принадлежат подмножеству, на котором тяга ТРДФ вне *тандема* меньше тяги ТРДФ в *тандеме*.

2.5. Программа регулирования *тандема*, сравнение по тяге

Полную программу регулирования максимальных режимов *тандема* можно представить в виде

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

$$\downarrow \\ (\theta_T, B_S/B_S', p_D/p_{\phi}, q_s, \theta_{\phi}, \Sigma a) = \text{const} = (\theta_T^{\alpha}, 1, 1, q_s^{\omega}, \theta_{\phi}^{\omega}, 0).$$

Выражение тяги представляется в виде

$$r_{y\delta} = [\theta_{\phi}(1 - \theta_z \theta_T / (\theta_K \theta_T))]^{1/2} - (\theta_B - 1)^{1/2},$$

где $\theta_z = \theta_S / \theta_D$. Преобразованием подчеркивается: основой является *условный цикл* турбокомпрессора ТРДФ

$$Z - K - \Gamma - \Omega \quad (\text{рис. 5}),$$

он регулируется законом неизменности приведенного числа оборотов ротора. В текущей точке диапазона максимальная удельная тяга *тандема* и прототипа «ТРДФ вне *тандема*» определяются формулами

$$\begin{aligned} r_{y\delta \text{ ТВРДЗ}} &= [\theta_{\phi}^{\omega}(1 - \theta_z \theta_T \theta_S / (\theta_K \theta_T \theta_S^{\omega}))]^{1/2} - (\theta_B - 1)^{1/2}, \\ r_{y\delta \text{ ТРДФ}^*} &= [\theta_{\phi}^{\omega}(1 - (\theta_B \theta_T / (\theta_B \theta_K \theta_T))^{\omega})]^{1/2} - (\theta_B - 1)^{1/2}, \end{aligned}$$

отношение удельных тяг

$$r_{y\delta \text{ ТВРДЗ}} / r_{y\delta \text{ ТРДФ}^*} > 1.$$

3. О возможных совершенствованиях проекта *тандема*

3.1. О совершенствовании процедур формирования остова, регулирования в рамках примерной структуры *тандема* О вариантах определения степени двухконтурности.

В примерном формальном формировании остова ТРДЦсм1 значение β^{α} задается произвольно. Предлагается ожидаемо перспективный алгоритм его определения.

Принимается:

изложенными выше процедурами при допустимых значениях β^{α} формируются остовы ТВРДЗ и программы регулирования;

из всевозможных вариантов концепции проекта ЛА выделяется семейство, параметр которого ζ - то значение θ_B , при котором продольная маневренность приоритетна, $\zeta \in [1, \theta_B^{\omega}]$;

функциональная зависимость тяги выражается в виде $R_{\text{ТВРДЗ}} = R_{\text{ТВРДЗ}}(\beta^{\alpha}, \zeta)$;

значение β^{α} определяется условием достижения максимума $R_{\text{ТВРДЗ}}(\beta^{\alpha}, \zeta)$.

О выборе точки формирования остова и переключения кардинальных законов регулирования ТРДЦсм1 на траектории.

Основное назначение ТРДЦсм1 – нивелирование негативных факторов регулирования ТРДФ. Следовательно, выбор точки формирования остова и применение составного закона регулирования состояний потока в турбокомпрессоре ТРДЦсм1 могут быть действенными факторами повышения эффективности программы регулирования *тандема*. Вариант программы представляется в виде

$$\theta_B \in [1, \theta_B^{\leftrightarrow}], \quad (e_T, F_{\phi}, \chi, e_T, e_{\phi}, F_{\phi}) = \text{var}, \quad \theta_B \in [\theta_B^{\leftrightarrow}, \theta_B^{\omega}]$$

\Downarrow
 \Downarrow

$$(\theta_{Г^{\leftrightarrow}} \theta_{В^{\leftrightarrow}} / \theta_{В^{\leftrightarrow}}, B_s / B_s', p_D / p_{\Theta}, q_s, \theta_{\Phi}, \Sigma a) = \text{const} \quad (\theta_{Г}, B_s / B_s', p_D / p_{\Theta}, q_s, \theta_{\Phi}, \Sigma a) = \text{const},$$

где \leftrightarrow - индекс точки формирования остова ТРДДсм1 и точки изменения условий регулирования его турбокомпрессора. Из сферы формирований структур детализация этой программы видится перспективной в силу расширения возможностей регулирования турбоventильатора.

О дроссельных режимах функционирования.

Следует ожидать: расширение возможностей управления дроссельными режимами повысит уровень перспективы практической разработки проектов *тандема*. Например, пусть значение β в доминантной точке приемлемо, ослабить влияние температуры потока продуктов сгорания на состояние потока перед ТРДФ желательно, устранение негативного фактора формированием остова ТРДДсм1 с увеличенной расчетной степенью двхконтурности нежелательно. В таком случае возможна следующая коррекция:

δ В диапазоне управления дроссельными режимами ТРДДсм1 выделяется под-диапазон, контролируемый исключительно системой автоматического регулирования,

$$u^m \leq u \leq u^{am} \leq u^a \leq 1,$$

где u – управление режимами ТРДДсм1, u^a – управление автоматического регулирования.

δ u^{am} полагается функцией от $\theta_{В}$,

$$u^{am} = 1 - \nu \theta_{В^{\leftrightarrow}} / \theta_{В}, \quad \theta_{В} \in [\theta_{В^{\leftrightarrow}}, \theta_{В^{\omega}}].$$

δ Подбором значения ν можно изменить состояние потока за ТРДДсм1 в желательном направлении. Форма программы регулирования *тандема* принимает вид

$$\theta_{В} \in [1, \theta_{В^{\leftrightarrow}}], \quad (e_{Г}, F_{\Delta}, \chi, e_{Г}, e_{\Phi}, F_{\Phi}) = \text{var} \quad \theta_{В} \in [\theta_{В^{\leftrightarrow}}, \theta_{В^{\omega}}], \quad (e_{Г}, F_{\Delta}, \chi, u^a, e_{Г}, e_{\Phi}, F_{\Phi}) = \text{var}$$

$$\Downarrow \qquad \qquad \qquad \Downarrow$$

$$(\theta_{Г^{\leftrightarrow}} \theta_{В^{\leftrightarrow}} / \theta_{В^{\leftrightarrow}}, B_s / B_s', p_D / p_{\Theta}, q_s, \theta_{\Phi}, \Sigma a) = \text{const} \quad (\theta_{Г}, B_s / B_s', p_D / p_{\Theta}, u^a / u^{am}, q_s, \theta_{\Phi}, \Sigma a) = \text{const},$$

где $u^a / u^{am} = \text{const} = 1$.

3.2. О коррекциях структур *тандема* вводом подсистем электрификации

О первом электрифицированном подтипе.

Отвод тепла в атмосферу с использованием явления термоэлектричества эффективно [7]. Ввод авиа-термоbатарей позволит и уменьшить температуру потока, и за счет преобразования части отводимой тепловой энергии увеличить давление перед основным двигателем.

Коррекция «ТВРД3 \rightarrow ТВРД4» заключается во вводе электромотора, двух авиа-термоbатарей (АТБ): АТБ1, функционирующей на тепле выхлопного газа вспомогательного двигателя, АТБ2, охлаждающий общий поток за вентилятором. В рис. 6 проводники электроэнергии не показаны, изображения контактных зон условны: спаи термоэлементов охлаждаются слоями атмосферы, что же касается подогреваемых спаев, то очевидно, по возможности их следует «встроить» и в некоторые спрямляющие аппараты турбоventильатора, и в направляющий аппарат компрессора ТРДФ.

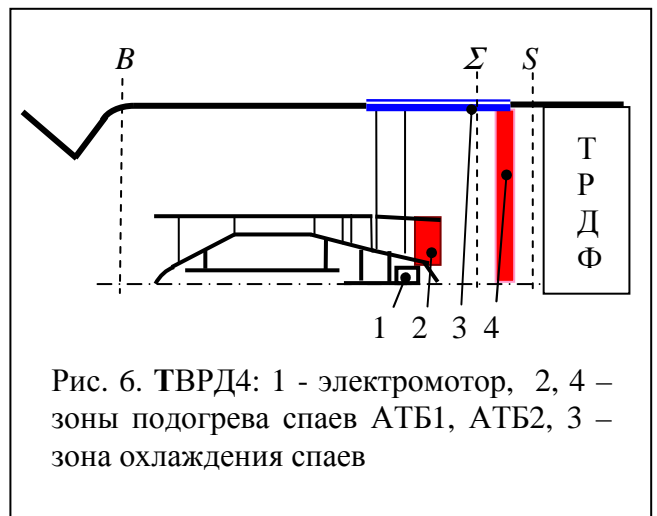


Рис. 6. ТВРД4: 1 - электромотор, 2, 4 – зоны подогрева спаев АТБ1, АТБ2, 3 – зона охлаждения спаев

Принимается ограничение применения АТБ в близкой перспективе: негативный фактор изменения температуры объемных потоков через поверхности его каналов существенен, температура торможения потока перед ТРДФ уменьшается, но $1 < \theta_2$ (рис. 5).

В модели оценок ТВРД4 различием условий функционирования АТБ1,2 можно пренебречь, положив: введена одна АТБ на энергии смешенного потока с подогреваемыми спаями между сечениями Σ , S . Отмечается специфика описания: при изобарном изменении состояний потоков в контактных зонах форма функционирования ТРДФ и турбокомпрессора ТРДДсм1 не изменяются, изменяются связи величин θ_T , θ_Θ , θ_D , θ_Σ , θ_S [7]:

$$(1 - \beta)(\theta_D - \theta_B) = \beta(\theta_T - \theta_\Theta) + \varepsilon_I,$$

$$\varepsilon_I = \eta^3(\theta_\Sigma - \theta_S),$$

$$0 < \varepsilon_I \leq \eta^3(\theta_\Sigma - \theta_A),$$

где ε_I – безразмерный расход энергии термоэлектричества, η^3 – коэффициент полезного действия АТБ, $0 \leq \eta^3 < 1$, A – индекс контактной зоны атмосферы.

Отмечаются следствия применения процедур сферы формирований виртуальных структур к электрифицированному подтипу ТРДДсм1 (ЭТРДДсм1) при $\theta_B \leftrightarrow \theta_B^\alpha$.

э Задается проектный расход электроэнергии

$$\varepsilon_I = \varepsilon_I^\alpha = \varepsilon_I^M, \quad 0 < \varepsilon_I^M \leq \eta^3(\theta_\Sigma - 1),$$

где ε_I^M – параметр формирования рационального остова ЭТРДДсм1. Определяются величины

$$(\theta_D, \theta_\Theta, \theta_\Sigma) = (\theta_D, \theta_\Theta, \theta_\Sigma)^\alpha.$$

э Отток тепла в атмосферу может быть увеличен вводом теплообменника. Прогноз воздействия комплекса «АТБ + теплообменник» может быть описан соответствующим уменьшением величины η^3 .

э Вариации ε_I системой регулирования не контролируются, в текущей точке функционирования

$$\varepsilon_I = \varepsilon_I^M(\theta_\Sigma - \theta_A)/(\theta_\Sigma^\alpha - 1),$$

где $1 \leq \theta_A \leq \theta_B$, $\theta_A = \theta_A(\theta_B)$ – в общем случае задаваемая функция, в сравнительных оценках коррекций структур принимается $\theta_A = 1$. В идеале

$$\theta_{D\text{ЭТРДДсм1}} > \theta_{D\text{ТРДДсм1}} \wedge \theta_{S\text{ЭТРДДсм1}} < \theta_{S\text{ТРДДсм1}} \rightarrow R_{\text{ТВРД4}}/R_{\text{ТВРД3}} > 1.$$

О втором электрифицированном подтипе.

Преобразование «ТВРД4 → ТВРД5» есть преобразование «ЭТРДДсм1 → ЭТРДДсм2» \wedge «ТРДФ → ЭТРДФ»:

в ТРДФ вводится электродвигатель, способный функционировать и как преобразователь электроэнергии в механическую энергию, и как генератор электроэнергии (электромотор↔генератор);

в ЭТРДДсм2 расширение продуктов сгорания происходит в поток, давление и температура торможения которого равны давлению и температуре потока на выходе из воздухозаборника, вентилятор ведомого контура ЭТРДДсм1 трансформирован в вентилятор смешенного потока, вместо электромотора введен электромотор↔генератор (рис. 7).

Трансформация вентилятора облегчает проблему его конструирования и регулирования, ввод электромоторов↔генераторов позволяет повысить уровень эффективности ТВРД5 рациональным (оптимальным) распределением энергий между подсистемами *тандема*.

Пусть регуляция площадей протока газа в сопле эффективна, возможности электрической подсистемы ЛА расширены вводом дополнительного аккумулятора. В таком случае появляются дополнительные возможности повышения уровня эффективности:

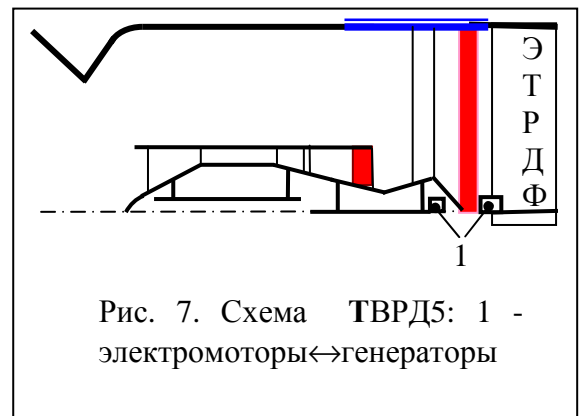


Рис. 7. Схема ТВРД5: 1 – электромоторы↔генераторы

Взлетную тягу можно увеличить использованием энергии, аккумулированной при аэродромном маневрировании.

На траектории при пониженном режиме функционирования можно аккумулировать энергию.

На траектории можно форсировать тягу расходом аккумулированной электроэнергии. Расширяются пределы продольного маневрирования тягой при относительно медленном изменении скорости вращения инертного ротора. Появляется возможность реализации специфических маневров ЛА с быстрыми вариациями тяги.

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.* О виртуальной структуре двигателя для сверхзвуковой авиации. ВЦ РАН, 2013.
5. *Жуков А.Н.* Двигатели сверхзвуковой авиации: очередные коррекции структур. М.: ВЦ РАН, 2013.
6. *Жуков А.Н.* Авиадвигатели с теплообменом между зонами газовых потоков: возможности прототипов, варианты коррекций. М.: ВЦ РАН, 2013.
7. *Жуков А.Н.* Об энергии термоэлектричества в производстве реактивной силы. М.: ВЦ РАН, 2013.
8. *Жуков А.Н.* О виртуальных двухконтурных двигателях для сверхзвуковой авиации. М.: ВЦ РАН, 2013.