

А.Н. ЖУКОВ

## ДВИГАТЕЛИ СВЕРХЗВУКОВОЙ АВИАЦИИ: О ПОДТИПАХ С ПОРШНЕВЫМИ АГРЕГАТАМИ

*Формируются подтипы авиадвигателя с форсажной камерой сгорания с вспомогательной поршневой подсистемой, программы регулирования. Цель процедур сравнения - оценка перспективы их внедрения в практику авиации.*

### ВВЕДЕНИЕ

Корневым прототипом виртуальных подтипов воздушно-реактивного двигателя (ВРД) является тип сверхзвуковой авиации «турбореактивный двигатель (ТРД) с форсажной камерой сгорания (ТРДФ)». Коррекции, повышающие эффективность функционирования в точке формирования остова актуальны. Коррекции ТРДФ с нерегулируемыми площадями потока газа в турбокомпрессоре как системы, призванной быть эффективной в широком диапазоне по температуре торможения набегающего потока [1] актуальны еще более.

Предлагается подтип, называемый ТРДФ с поршневой подсистемой (ТРДФп). Вводятся обводной канал, поршневая подсистема, соединяющая роторы турбокомпрессора и поршневого блока муфта (рис. 1, где 1 – воздухозаборник, 2 – компрессор, 3 – камера сгорания, 4 – турбина, 5 – обводной канал, 6 – муфта, 7 – ресиверы, 8 – емкость с поршнем, 9 – вал ротора поршневого блока, 10 – камера смещения, 11 – форсажная камера сгорания, 12 – сопло). Исходная поршневая подсистема: 4-тактная из одинаковых емкостей, подвод тепла – изохорный, расход газа через нее значительно меньше расхода через турбину.

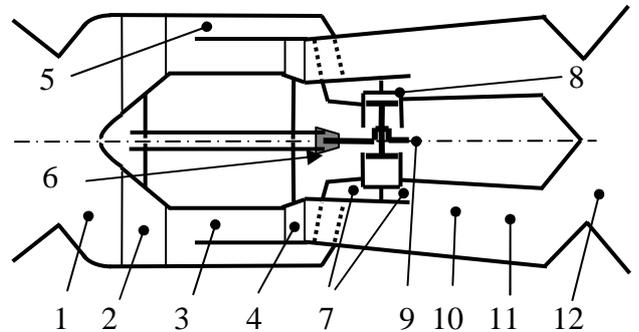


Рис. 1. ТРДФп

Анализ эксплуатации наземных двигателей внутреннего сгорания, формирования двухконтурных ВРД дискретного действия [2] показывают: термореактивная эффективность в точке формирования остова у них выше, чем у ВРД непрерывного действия; есть возможности нивелирования негативных факторов поршневого блока; дискретность позволяет регулировать систему эффективнее. Тем не менее, в априорных оценках ТРДФп возникают вопросы.

- В практике сверхзвуковой авиации ВРД с дискретной подсистемой не применяются. Это может означать, что уровни габаритного, весового совершенства поршневого блока неприемлемы. Повышаются ли они настолько, что разработка ТРДФп будет целесообразной?
- Пусть габариты, вес поршневого блока уменьшены до приемлемых значений. Не будет ли перспективнее схема, в которой блок расположен сразу за компрессором, его продукты сгорания подогревают поток перед основной камерой сгорания, ротор блока - фрагмент единого ротора?
- Регулирование изменит энергию вращения ротора поршневого блока. Кардинальные ограничения – число оборотов, приведенное число оборотов ротора турбокомпрессора не могут быть больше максимальных значений – означают ввод муфты, позволяющей варьировать скорость вращения ротора блока независимо от скорости вращения ротора турбокомпрессора. Проблема обеспечения надежности функционирования усложняется.

Найдется ли позитивная альтернатива регулируемой передаче энергии между турбокомпрессором, поршневой подсистемой?

- Не будет ли ожидаемое влияние коррекций нивелировано ограничениями более подробных описаний, в частности, ограничениями диапазонов по скорости вращения роторов?

В тексте рассматриваются некоторые возможности усовершенствования подтипа усовершенствованием поршневой подсистемы.

## **1. Предварительные обсуждения формирований, регулирования**

### **1.1. О модификациях исходного подтипа**

Отмечаются основные результаты исследований ВРД с поршневыми подсистемами [2]:

в идеале замена турбокомпрессора поршневым блоком дает максимальный позитивный эффект;

существенное негативное влияние дискретности продвижения газа не позволяет построить рациональные по критериям практики варианты одноконтурного ВРД с подводом энергии топлива только в поршневой подсистеме, нивелирование негативного аспекта дискретного процесса желательно;

при более тщательном учете специфики функционирования в авиации возможно построение вариантов, у которых расход газа по сравнению с расходом через мотор увеличится более чем в два раза, габариты, вес ожидаются приемлемыми, разработка ТРДФп - целесообразной;

высокий уровень эффективности ожидается у той модификации, в которую будет входить 2-тактный блок, для которого такты сжатия, заполнения исполняет лопаточная машина;

переход от непрерывного подвода к дискретному подводу тепла в двухконтурном варианте дозвукового ВРД может увеличить тягу ВРД в  $\approx 1,5$  раза.

Отмечаются некоторые ожидаемые особенности формирования остовов модификаций ТРДФп по условию локально-оптимального функционирования.

1. Пусть формируются модификации ТРДФп: поршневой блок - 2-тактный и весь процесс сжатия воздуха исполняет компрессор. Можно ожидать: найдутся такие практически важные условия формирования остова, при которых уровень эффективности у ТРДФп будет выше при допустимости разной степени повышения давления воздуха перед подводом тепловой энергии в основной камере сгорания и поршневой подсистеме. Конструктивно желательная разность сжатий воздуха может быть обеспечена как вводом *подпорных ступеней* компрессора перед обводным каналом, так и вводом в поршневую подсистему *дискретных нагнетателей* – совокупности емкостей с поршнем без камеры сгорания.

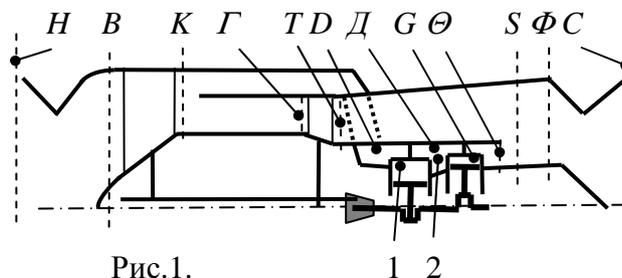
2. Нагнетатель может быть емкостью с завершающим движением поршня при открытых отверстиях выпуска газа до соприкосновения с торцевой стенкой, в режимах функционирования момент открытия отверстий быть действенным регулирующим фактором.

3. Предельные максимальные скорости вращения роторов будут различными. С учетом того, что основное сжатие газа происходит вне поршневого блока, можно ожидать: предельная скорость вращения его ротора будет больше, чем ротора турбокомпрессора.

4. Максимальная скорость вращения ротора турбокомпрессора – основной фактор минимизации габаритов, веса. В силу значительно меньшего расхода через поршневую подсистему влияние скорости вращения ее ротора на габариты, вес ТРДФп будет существенно слабее.

5. Трансформация «ТРДФ → ТРДФпJ» не даст увеличения тяги в  $\approx 1,5$  раза в точке формирования остова, но можно ожидать не меньшего увеличения по сравнению с преобразованием «ТРДФ → ТРДСФ (ТРДФ со средненапорной камерой сгорания, отношение  $\approx 1,03$ » [1]).

Принимается: ТРДФп модифицируется вводом 2-тактного поршневого блока с дискретными нагнетателями; конструкции нагнетателей, емкостей с камерами сгорания допускают регулирование нескольких параметров процесса. Модификация обозначается ТРДФпN. В рис. 2  $H, B, K, G, T, \Phi, C$  - обозначения сечений ТРДФ,  $\Theta$  и  $S$  - на выходе из поршневого блока и камеры смешения,  $D, Д, G$  - состояния заторможенного потока на входе в емкости блока, в конце подвода тепловой энергии в дискретном процессе, 1 - нагнетатель, 2 - ресивер. В описаниях регулирования используются сечения  $\nu$  - вход в компрессор,  $z$  - вход в турбину,  $\phi$  - в критическом сечении сопла, в которых поток - скоростной.



## 1.2. Программы регулирования: первые замечания

Отмечаются принципы сравнений процедуры 7 из [1]: остовы формируются по условиям оптимального функционирования в доминантной расчетной точке; моделируются максимальные режимы, перепад давления газа в сопле полагается сверхкритическим; площадь протока газа в срезе сопла регулируется по условию равенства давления в потоке атмосферному давлению и в программах регулирования оно не отмечается; возможные траектории летательного аппарата (ЛА) аппроксимируют траектории на постоянной высоте, множество состояний набегающего потока представляет диапазон по температуре торможения потока, ограниченный температурами в точке старта и в доминантной точке, в предельных точках диапазона величины помечаются индексами  $\alpha$  и  $\omega$ ; во всем диапазоне функционирования применяется закон регулирования «неизменность приведенного числа оборотов ротора турбокомпрессора», по иному – неизменность относительной плотности тока на входе в компрессор; формируются программы регулирования, по ним двигатели приводятся в точку старта и там сравниваются по тяге.

Представляется программа регулирования ТРДФ:

$$T_B \in [T_H, T_B^\omega], \quad (E_G, E_\phi, F_\phi)_{\text{ТРДФ}} = \text{var} \Rightarrow (T_G/T_B, T_\phi, \Sigma A)_{\text{ТРДФ}} = \text{const}^{\alpha\omega},$$

где  $T$  – температура,  $E$  – тепловая энергия,  $F$  – площадь протока газа,  $\Sigma A$  – сумма работ лопаточных машин, **var** и **const** – отметка варьируемых и контролируемых системой автоматического регулирования величин,  $\text{const}^{\alpha\omega} = (T_G^\omega/T_B^\omega, T_\phi^\omega, 0)$ .

Отмечаются ожидаемые условия локально-оптимального функционирования ТРДФп: температуры газа на выходе из камер сгорания, скорости вращения роторов, относительные плотности тока на входе в компрессор и дискретную подсистему равны расчетным максимальным значениям; равенство давлений потоков газа при смешении [3].

Простейшая программа регулирования ТРДФп заключается в отказе от возможности регулирования поршневой подсистемы. Сокращенное представление программы – то же, что и у ТРДФ, развернутая форма отличается увеличенным составом температур, оп-

ределяемых условием *подобия температур турбокомпрессора и поршневой подсистемы*, и функций скоростей вращения роторов,

$$\begin{aligned} T_i &= T_i^{\varpi} = T_i^{\omega} T_B / T_B^{\omega}, \quad i = K, T, D, D, G, \Theta, S, \\ n &= n_{np} = n^{\langle \varpi \rangle} = n^{\omega} (T_B / T_B^{\omega})^{1/2}, \\ n^{\delta} &= n_{np}^{\delta} = n^{\delta \langle \varpi \rangle} = n^{\delta \omega} (T_B / T_B^{\omega})^{1/2}, \end{aligned}$$

где  $\varpi$  - индекс подобных температур,  $n$  - число оборотов ротора турбокомпрессора,  $n_{np}$  - индекс приведенного числа оборотов,  $n^{\delta}$  - число оборотов ротора поршневой подсистемы,  $\langle \varpi \rangle$  - индекс величин режима подобия, которые не определяются умножением на коэффициент подобия  $T_B / T_B^{\omega}$ . Отмечаются следствия такого регулирования:

- ☞ отношение скоростей вращения роторов неизменно;
- ☞ течения потока на входе в головной ресивер, в емкости блока подобны по числу Маха, отношение расхода газа через турбину к расходу через компрессор, отношение работ газа в турбине и блоке неизменны;
- ☞ подобие температур газа в турбине и блоке, неизменность отношения расхода газа через турбину к расходу через компрессор означают неизменность условий смешения.
- ☞ В преобразовании «ТРДФ → ТРДСФ» при  $T_B^{\omega} / T_H = 3$  тяга увеличивается в  $\approx 1,03$  раза, при  $T_B / T_H = 1$  оно увеличивается до  $\approx 1,1$ . Следовательно, в «ТРДФ → ТРДФп» можно ожидать не меньшего увеличения.

### 1.3. О механизмах регулирования поршневого блока

Анализируются варианты регуляции поршневого блока, не влияющие на поток в обводном канале,  $n^{\delta \langle \varpi \rangle} = const$ .

1. Пусть расход топлива увеличен,  $T_G^{\varpi} < T_G \leq T_G^{\omega}$ . Восстановление баланса работ на валах роторов вариацией  $F_{\phi}$  - минимальной площади протока в сопле - затруднительно, в рамках агрегированной модели невозможно. Его можно восстановить выпуском продуктов сгорания из емкостей до прихода поршней в «нижнюю мертвую точку» - давление газа на выходе из поршневого блока увеличится еще более. Обычно выпуск сжатого газа в атмосферу - это утрата части механической энергии, при длительном режиме функционирования и большом давлении выпускаемого газа он неприемлем. В авиации такой способ приемлем, так как в итоге увеличивается сила реактивной струи.
2. Имеет место ограничение: при сверхкритическом перепаде давления потоков в смешении возникает сверхзвуковое течение, что недопустимо. Восстановление возможно вариацией площади  $F_{\phi}$ : с уменьшением значения  $F_{\phi}$  давление смешенного потока и потока на выходе из турбины будут увеличиваться, давление потока на выходе из поршневого блока по условию обеспечения баланса работ на валах роторов будет уменьшаться, тяга увеличится еще более.
3. Можно воздействовать на процесс коррекцией объема воздуха перед подводом тепла. Например: допустимо перемещение части цилиндра со сводом (торцевой стенкой) камеры сгорания, поскольку в принятом 2-тактном варианте отсутствует процесс сжатия и время функционирования в равновесных режимах больше времени исполнения такта; в силу относительно небольших габаритов возможно изменение положения фрагмента боковой стенки, длины рабочего хода поршня. Коррекция объема камеры сгорания требует согласованную коррекцию давления газа на выходе из нагнетателя - например, в варианте нагнетателя с приходом поршня в соприкосновение с торцевой стенкой она может быть исполнена вариацией длины хода поршня с открытыми отверстиями выпуска газа, давление которого такое, чтобы давление газа на выходе из поршневого блока увеличилось. Тяга увеличится еще более.
4. Результаты обсуждения - имеются дополнительные факторы регулирования, они позитивны, возможна трактовка вспомогательных условий регулирования в виде

$$(E_G, L_G^{\delta}, F_{\phi}, L_{\delta}^{\delta}) = var \Rightarrow (T_G, \Sigma A, p_{\phi} / p_T, p_{\phi} / p_{\phi}^{(0)}) = const = (T_G^{\omega}, 0, 1, 1),$$

где  $L_G^f$  – длина хода поршня с открытыми отверстиями выпуска продуктов сгорания,  $L_D^f$  – длина хода поршня с открытыми отверстиями выпуска сжатого воздуха, вариация  $L_D^f$  определяет вариацию объема камеры сгорания,  $p$  – давление,  $p_{\theta}^{[0]}$  – максимальное значение  $p_{\theta}$  по аргументу  $L_D^f$  в текущей точке диапазона регулирования.

Допустимость вариаций состояний газа в емкостях при неизменности состояния потока во входном ресивере имеет принципиальное значение. Пример:

Пусть вместо поршневой подсистемы установлены камера сгорания и турбина. В такой модификации увеличение расхода топлива во вспомогательной камере сгорания при неизменности площадей протока в турбинах означает увеличение давления газов перед турбинами, что недопустимо.

Обсуждается возможность увеличения тяги влиянием регулирования поршневого блока на состояния потоков перед ним при ограничении – *регуляторы не изменяют состояние потока на выходе из компрессора*. Это означает, что возможно лишь перераспределение расхода воздуха через турбину, обводной канал.

Пусть расход воздуха через обводной канал увеличен. Соответственно уменьшатся расход газа через турбину, относительная плотность тока в ее первом сопловом аппарате. При неизменности площадей протока значение  $q_2$  можно восстановить увеличением температуры газа перед турбиной. Зависимость температуры от вариации расхода газа определяется выражениями расходов в опорном режиме и режиме с вариацией. При произвольной величине  $T_G$

$$B_2 = q_2 F_2 p_T / T_G^{1/2} \hat{C},$$

где  $B$  – расход газа,  $q$  – относительная плотность тока,  $\hat{C}$  – константа. В принятых ограничениях

$$(q_2 F_2 p_T) = \text{const} \rightarrow T_G / T_G^{\theta} = (B_2^{\theta} / B_2)^2.$$

При равенстве работ такой результат означает не только увеличение  $T_G$ , но и увеличение давления, температуры газа на выходе из турбины. Можно ожидать значительного увеличения тяги при допустимости применения в регулировании условия  $T_G = \text{const} = T_G^{\theta}$ , поскольку и в поршневой подсистеме ожидается увеличение расхода

$$\begin{aligned} B_D &= B_D(T_G = T_G^{\theta}) = B_D^{\theta} + B_2^{\theta} (1 - (T_G^{\theta} / T_G^{\theta})^{1/2}) = \\ &= B_D^{\theta} + B_2^{\theta} (1 - (T_B / T_B^{\theta})^{1/2}). \end{aligned}$$

Желательное увеличение  $B_D = B_D(T_G = T_G^{\theta})$  при варианте остова, сформированного по условиям локальной оптимальности в доминантной точке, невозможно, так как максимальная величина числа Маха втекания воздуха через отверстия впуска в емкость равна предельно допустимому значению и неизменна в режимах подобия. Принимается устранение ограничения условием: остов формируется при числе Маха втекания в емкость меньше предельно допустимого значения. Поскольку интегральная эффективность сверхзвукового ВРД существенно зависит от условий регулирования и основной вклад в габариты, вес конструкции дает турбокомпрессор, то следует ожидать: максимальное число Маха втекания в емкость можно уменьшить значительно.

Возможны два способа увеличения пропускной способности поршневого блока в нерасчетном режиме - увеличением объема в такте заполнения емкости воздухом, увеличением частоты исполнения тактов.

Отмечается специфика варьирования рабочего объема нагнетателя:

Регулирование положения торцевой стенки и радиуса вращения кривошипа из-за отсутствия процесса горения легко осуществимо;

может быть перспективным применение емкостей прямоугольной формы, варьирование элементов боковых стенок;

равенство объема сжатого нагнетателем воздуха объему в такте заполнения емкости с камерой сгорания может быть достигнуто коррекцией момента выпуска из нагнетателя, коррекцией рабочего объема емкости с камерой сгорания, совместной коррекцией;

рациональная модификация ТРДФпН в вариант с единым ротором при варьировании объема емкости возможна.

Отмечаются аспекты увеличения расхода воздуха через обводной канал вариациями числа оборотов ротора дискретной подсистемы с муфтой, позволяющей варьировать разность скоростей вращения роторов:

при  $n^{\partial\omega} = n^{\partial M}$ , ( $M$  – индекс максимальной величины) вариации  $n^{\partial} \in (n^{\partial\leftarrow}, n^{\partial\omega}]$ , максимально возможный расход

$$B_D = B_D(n^{\partial} = n^{\partial\omega} = n^{\partial M}) = B_D^{\leftarrow} n^{\partial\omega}/n^{\partial\leftarrow} = B_D^{\leftarrow} (T_B^{\omega}/T_B)^{1/2};$$

формирование остова ТРДФпН при  $n^{\partial\omega} < n^{\partial M}$  допустимо, диапазон вариаций увеличивается,  $n^{\partial} \in (n^{\partial\leftarrow}, n^{\partial M}]$ .

Отмечается: позиция поршневой подсистемы в структуре ТРДФп имеет существенное значение. Например, пусть поршневой блок установлен между компрессором и основной камерой сгорания. Ее ввод повысит уровень термодинамической эффективности прототипа в точке формирования остова. Однако при нерасчетных условиях функционирования вариации расхода газа через турбину будут невозможны, отклонения от режимов подобия будут сильно ограничены.

#### 1.4. Примерные варианты программ регулирования

Простейшая программа регулирования ТРДФпН с *подобием температур турбокомпрессора, поршневого блока* – опорная вариантов с дополнительной регуляцией – представляется в форме

$$T_B \in [T_H, T_B^{\omega}], (E_G, E_{\phi}, F_{\phi}) = \mathbf{var} \Rightarrow (q_{\phi}, T_{\phi}, \Sigma A) = \mathbf{const}^{\omega\omega},$$

она неизменна в вариантах отказа от *подобия температур* (индекс ТРДФпН опущен).

В процедуру формирования остова ТРДФпН вносятся коррективы: в точке формирования его функционирование оптимально по термореактивным критериям; по критериям габаритов, веса конструкции он может быть не оптимальным – допускаются расчетные значения максимального числа Маха втекания в емкость поршневого блока, числа оборотов его ротора меньше предельно допустимых значений.

Основное назначение 1-го варианта программы регулирования – качественные оценки в формированиях структур на  $[T_H, T_B^{\omega}]$ . Его дополнение можно представить в виде

$$\wedge (E_G, W_D^{\leftarrow}) = \mathbf{var} \Rightarrow (T_G, B_D/(B_B - B_c)) = \mathbf{const} = (T_G^{\omega}, 1) \wedge \\ (E_G, L_G^{\leftarrow}, F_{\phi}, L_D^{\leftarrow}) = \mathbf{var} \Rightarrow (T_G, \Sigma A, p_{\phi}/p_T, p_{\phi}/p_{\phi}^{[0]}) = \mathbf{const} = (T_G^{\omega}, 0, 1, 1)$$

где индекс варианта опущен,  $W_D^{\leftarrow}$  – рабочий объем нагнетателя. Иерархией условий регулирования подчеркнута:

традиционный закон регулирования определяет пределы изменения вспомогательных регулирующих факторов;

вспомогательная регуляция состояния потока перед турбиной приоритетна;

задается алгоритм расчета высотно-скоростных характеристик.

В 1-м варианте программы состав вспомогательных регулирующих факторов, обеспечивающий предельно высокий уровень эффективности регулирования, минимальный, их ввод в значительной степени формален. Применительно к практике диапазон варьирования некоторых факторов не будет покрывать диапазон  $[T_H, T_B^{\omega}]$ , если он достаточно большой, если же он невелик, то целесообразно упрощение программы.

Пусть диапазон варьирования объема нагнетателя недостаточен. Тогда в качестве дополнительного регулирующего фактора можно использовать число оборотов ротора поршневого блока, 2-й вариант дополнения может иметь вид

$$\wedge T_B \in [T_B^{\leftarrow}, T_B^{\omega}], (E_G, W_D^{\leftarrow}) = \mathbf{var} \Rightarrow (T_G, B_D/(B_B - B_c)) = \mathbf{const} = (T_G^{\omega}, 1) \\ \wedge T_B \in [T_H, T_B^{\leftarrow}], (E_G, n^{\partial}) = \mathbf{var} \Rightarrow (T_G, B_D/(B_B - B_c)) = \mathbf{const} = (T_G^{\omega}, 1) \\ \wedge (E_G, L_G^{\leftarrow}, F_{\phi}, L_D^{\leftarrow}) = \mathbf{var} \Rightarrow (T_G, \Sigma A, p_{\phi}/p_T, p_{\phi}/p_{\phi}^{[0]}) = \mathbf{const} = (T_G^{\omega}, 0, 1, 1)$$

где  $\leftarrow$  – индекс точки изменения условия регулирования, в ней

$$n^{\partial} = n^{\partial M}, n_{np}^{\partial} = n_{np}^{\partial\omega} = n_{np}^{\partial M}.$$

В варианте состав параметров регулирования не изменился, оценки термореактивной эффективности в агрегированных описаниях будут такими же, что и в 1-м варианте.

Пусть негативное влияние не идеальности регулирования поршневого блока значительно, диапазон  $[T_H, T_B^{\omega}]$  позволяет нивелировать это влияние увеличением числа регулирующих факторов. Тогда 1-й вариант программы можно трансформировать включением в нее условий

$$n^{\delta} = var \Rightarrow R/R^{[0]} = const = 1,$$

где  $R$  – тяга,  $R^{[0]}$  – максимальное значение  $R$  по аргументу  $n^{\delta}$  в текущей точке диапазона регулирования.

Специфика дискретности поршневого блока позволяет реализовать комплексный подвод тепла, состоящий из двух разных политропических процессов. Момент изменения условия подвода тепла может быть действенным регулирующим фактором, 2-й вариант программы может быть трансформирован включением в нее условий

$$E_G^I = var \Rightarrow R/R^{[0]} = const = 1,$$

где  $E_G^I$  – тепловая энергия, подведенная в 1-м политропическом процессе,  $R^{[0]}$  – максимальное значение  $R$  по аргументу  $E_G^I$  в текущей точке диапазона регулирования.

Пусть диапазон  $[T_H, T_B^{\omega}]$  относительно невелик, смешение потоков с разными давлениями происходит при дозвуковых течениях с приемлемыми потерями механической энергии. Тогда можно упростить 1-го вариант программы исключением из нее условий

$$F_{\phi} = var \Rightarrow p_{\phi}/p_T = const = 1.$$

## 2. Формальные сравнения

### 2.1. Модель функционирования, сравнения в локальных условиях

Принимается аппроксимация процесса подвода тепла в дискретной подсистеме изобарным процессом.

Уравнения тяги, расхода тепловой энергии, сохранения энергии при смешении, баланса работ в изоэнтروпийных процессах ТРДФПН (рис. 2) имеют вид

$$\begin{aligned} R &= B_H(V_C - V_H) = B_H\{[2c_p(T_{\phi} - T_C)]^{1/2} - [2c_p(T_B - T_H)]^{1/2}\}, \\ E &= E_{\Gamma} + E_G + E_{\phi} = c_p[B_{\Gamma}(T_{\Gamma} - T_K) + B_D(T_G - T_D) + B_H(T_{\phi} - T_S)], \\ (B_H - B_{\Gamma})T_{\theta} + B_{\Gamma}T_T &= B_H T_S, \\ B_H(T_K - T_B) + B_D(T_D - T_K) &= B_{\Gamma}(T_{\Gamma} - T_T) + B_D(T_G - T_{\theta}), \end{aligned}$$

где  $R$ ,  $V_b$ ,  $T_b$ ,  $B_b$  – соответственно тяга, скорость, температура, расход газа,  $c_p$  – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении,  $E$  – расход тепловой энергии топлива,  $E_G$  и  $B_D$  – осредненные расход тепловой энергии и расход газа в дискретной подсистеме,

$$B_D \cong KM/\tau, \quad E_G \cong K\Delta Q/\tau,$$

$K$  – число одинаковых емкостей с камерами сгорания в подсистеме,  $\Delta M$  – масса рабочего тела цикла в емкости,  $\tau$  – время прихода поршней в исходное состояние,  $\Delta Q$  – количество подводимого в емкости тепла.

Принимается – равенство давлений газов на выходе турбины и из поршневой подсистемы –

$$p_T = p_{\theta} = p_S \Rightarrow T_T/T_{\Gamma} = T_D T_{\theta}/(T_K T_G);$$

изоэнтропийное сжатие, расширение газов в воздухозаборнике, компрессоре, турбине, емкостях, сопле

$$p_i/p_j = (T_i/T_j)^{\kappa/(\kappa-1)},$$

где  $\kappa = c_p/c_v$ ,  $c_v$  – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении; изобарный подвод тепла –

$$p_{\Gamma} = p_K, \quad p_D = p_G, \quad p_S = p_{\phi}.$$

Условия позволяют представить основу модели двумя обратимыми циклами, величины газодинамического процесса связать обратимостью корневого цикла (его рабочее тело – газ основной камеры сгорания):

$$\oint \delta E/T_{\kappa} = 0 \Rightarrow T_K/T_H = (T_{\Gamma}/T_T)(T_{\phi}/T_C),$$

где  $\delta E$  - элементарное приращение тепловой энергии в круговом процессе,  $k$  - индекс корневого цикла.

На величины налагаются ограничения-неравенства:

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

где принято, что коррекция структуры не влияет на максимально допустимые значения температур прототипа. Что же касается максимально допустимой температуры газа в емкости, то при ограничении  $T_\Phi^M$  стехиометрическим составом продуктов сгорания величина  $T_G^M$  может быть больше  $T_\Phi^M$ .

Система соотношений будет описывать функционирование прототипа, если положить  $B_D = B_H - B_G = 0$ , величины пометить индексом ТРДФ.

Вводятся безразмерные величины. Соотношения идеальной терморективной системы «ТРДФпН» принимают вид

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

где  $r_{y\delta}$ ,  $v_j$ ,  $\theta_j$ ,  $e$  - соответственно безразмерные величины удельной тяги, скорости, температуры, относительного количества тепла,  $\beta$  - отношение расхода газа через турбину к расходу воздуха через двигатель. Размерные величины определяются формулами

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

В локальных условиях функционирования вся совокупность величин классифицируется следующим образом:  $r_{y\delta}$  - единый критерий;  $\alpha$  - вектор параметров (параметров семейства локально-оптимальных представителей типа «ТРДФпН»),  $\alpha = (\theta_B, \theta_G^M, \theta_G^M, \theta_\Phi^M, \beta)$ ;  $x$  - вектор переменных,  $x = (e, \theta_K, \theta_G, \theta_T, \theta_G, \theta_\Theta, \theta_\Phi, \theta_C)$ . 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 исключением зависимых переменных. Величины  $\theta_K, \theta_D, \theta_G, \theta_C, \theta_\Phi$  полагаются независимыми переменными. С исключением  $\theta_C$  подстановкой его выражения в выражение тяги последнее трансформируется в выражение

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

последняя зависимая переменная -  $\theta_T$  - исключается подстановкой

$$\theta_\Theta = \theta_K\theta_T\theta_G/(\theta_G\theta_D)$$

в баланс энергий в изоэнтропийных процессах, откуда

$$\theta_T = [\beta\theta_G + (1 - \beta)\theta_G - \theta_K + \theta_B - (1 - \beta)(\theta_D - \theta_K)]/[\beta + (1 - \beta)\theta_K\theta_G/(\theta_G\theta_D)].$$

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

$$\theta_G^0 = \theta_G^M, \theta_C^0 = \theta_C^M, \theta_\Phi^0 = \theta_\Phi^M,$$

где индексом  $^0$  помечены оптимальные величины. Определяются стационарные значения  $\theta_K, \theta_D$ :

$$\partial r_{y\delta}/\partial \theta_K = 0, \quad \partial r_{y\delta}/\partial \theta_D = 0 \rightarrow \theta_D = \theta_D^0 = \theta_K(\theta_G/\theta_T)^{1/2},$$

$\theta_K^0$  определяется кубическим уравнением

$$\theta_T/\theta_K^2[\beta(\theta_T - \theta_K) + (1 - \beta)(\theta_G - \theta_D + \theta_B)] - [\beta\theta_T\theta_D + (1 - \beta)\theta_K\theta_G] = 0.$$

Таким образом, при  $0 < \beta < 1$  отношение  $r^0/r^0_{\text{ТРДФ}}$  больше единицы при всех допустимых проектных температурах торможения набегающего потока и тем больше, чем больше значение  $1 - \beta$ .

*Примеры сравнений.* Поскольку при  $\beta = 1$  оптимальное выражение  $\theta_K$

$$\theta_K = \theta_K^0(\beta = 1) = \theta_{\text{ТРДФ}}^0 = (\theta_T + \theta_B)/2,$$

по сравнению с прототипом расход газа через турбину уменьшается на относительно малую величину, то с достаточной для формирований подтипов точностью можно положить

$$\begin{aligned}\theta_K &= \theta_K^{\approx 0}(0,5 < \beta < 1) \approx \theta_{\text{ТРДФ}}^0 = (\theta_T + \theta_B)/2, \\ \theta_D &= \theta_D^{\approx 0}(0,5 < \beta < 1) \approx \theta_K^{\approx 0}(\theta_G/\theta_T)^{1/2},\end{aligned}$$

где  $\approx$  - индекс приближенной величины.

В таблице 0 величины вычисляются при  $\theta_\phi^0 = 10$  ( $T_H = 216,5^0$  абс,  $T_\phi^0 = 2165^0$  абс),  $\theta_T^0 = 8$  ( $T_T^0 = 1730^0$  абс),  $\theta_G^0 = 11$  ( $T_G^0 = 2380^0$  абс),  $\beta = \beta^0 = 3/4$ .

Таблица 0.

$\theta_B$	$v_H$	$\theta_D^{\approx 0}$	$\theta_{\text{ТРДФ}}^0$	$\theta_T^{\approx 0}$	$v_C$	$v_{\text{СТРДФ}}$	$r^{\approx 0}_{y\phi}$	$r^0_{y\phi \text{ ТРДФ}}$
1	0	5,28	4,5	4,85	2,52	2,46	2,52	2,46
2	1	5,86	5	5,3	2,64	2,605	1,64	1,605
3	1,41	6,45	5,5	5,78	2,735	2,7	1,325	1,29
4	1,73	7,04	6	6,22	2,787	2,785	1,057	1,055

## 2.2. Сравнительные оценки регулируемых подтипов

Процедура 7. Принимается: ТРДФпN регулируется по 1-му варианту -

$$\theta_B \in [1, \theta_B^\omega], \quad (e_T, e_\phi, F_\phi) = \mathbf{var} \Rightarrow (q_\phi, \theta_\phi, \Sigma A) = \mathbf{const}^{\omega\omega}$$

$$\wedge \\ (e_T, W_{D_1}^{\approx}) = \mathbf{var} \Rightarrow (\theta_T, B_D/(B_B - B_c)) = \mathbf{const} = (\theta_T^\omega, 1),$$

$$\wedge \\ (e_G, L_G^i, F_\phi, L_D^i) = \mathbf{var} \Rightarrow (\theta_G, \Sigma A, p_\phi/p_T, p_\phi/p^0) = \mathbf{const} = (\theta_G^\omega, 0, 1, 1),$$

что в принятых упрощениях означает вычисление максимальной тяги по формулам

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

$$\theta_T = [\beta\theta_T + (1 - \beta)\theta_G - \theta_K + \theta_B - (1 - \beta)(\theta_D - \theta_K)]/[\beta + (1 - \beta)\theta_K\theta_G/(\theta_T\theta_D)],$$

в которых

$$\theta_T = \theta_T^{[M]} = \theta_T^M = \theta_T^0, \quad \theta_G = \theta_G^{[M]} = \theta_G^M = \theta_G^0, \quad \theta_\phi = \theta_\phi^{[M]} = \theta_\phi^M = \theta_\phi^0,$$

$$\theta_K = \theta_K^{\approx} = \theta_K^{\approx 0} \theta_B/\theta_B^\omega, \quad \theta_D = \theta_D^{\approx} = \theta_D^{\approx 0} \theta_B/\theta_B^\omega,$$

$$\beta = \beta^{[M]} = \beta^0(\theta_T^{\approx}/\theta_T^{[M]})^{1/2}, \quad \theta_T^{\approx} = \theta_T^{[M]} \theta_B/\theta_B^\omega,$$

индексом  $^{[M]}$  помечены максимальные величины в  $[1, \theta_B^\omega]$ .

Принимается программа регулирования ТРДФ:

$$\theta_B \in [1, \theta_B^\omega], \quad (e_T, e_\phi, F_\phi)_{\text{ТРДФ}} = \mathbf{var} \Rightarrow (q_\phi, \theta_\phi, \Sigma A)_{\text{ТРДФ}} = \mathbf{const}^{\omega\omega}.$$

Тяга вычисляется по формуле

$$r^{[M]}_{y\phi \text{ ТРДФ}} = \{[\theta_\phi^0(1 - \theta_T^{\approx}/(\theta_K^{\approx}\theta_T^{\approx}))]^{1/2} - (\theta_B - 1)^{1/2}\}.$$

Результаты приведения примерных представителей типов (таблица 0,  $\theta_B^\omega = 3$ ) в условия с нулевой скоростью полета сведены в таблицу 1.

Таблица 1. ( $\theta_B^\omega = 3 \rightarrow \theta_B = 1$ )

$\theta_K^{\approx}$	$\theta_D^{\approx}$	$\beta^{[M]}$	$\theta_T^{[M]}$	$r^{[M]}_{y\phi}$	$r^{[M]}_{y\phi \text{ ТРДФ}}$	$r^{[M]}/r^{[M]}_{\text{ТРДФ}}$
1,835	2,15	0,433	7,96	2,125	1,448	1,47

Анализ выражений тяг как функций от  $\theta_B$ ,  $\theta_B^\omega$  показывает: в практической области применения ТРДФ отношение  $r^{[M]}/r^{[M]}_{\text{ТРДФ}} > r^{\approx}/r^{\approx}_{\text{ТРДФ}}$  и оно тем больше, чем больше разность  $\theta_B^\omega - \theta_B$ ; влияние увеличения расхода воздуха через обводной контур на взлет-

ную тягу существенно, в силу чего следует ожидать существенной нелинейности взлетной тяги как функции от расчетной скорости движения ЛА.

Процедура 2 позволяет оценить возможности ВРД в рамках тех концепций проекта ЛА, в которых применение вспомогательных средств обеспечения взлета нежелательно. Основа сравнений:

- ◆ Остов, программа регулирования ТРДФпN – те же, что и в процедуре 1.
- ◆ Значения тяг выравниваются при  $\theta_B = 1$ . Выравнивание достигается применением комбинированной программы регулирования ТРДФ, в которой интервал регулирования законом  $q_\epsilon = const$  уменьшен. Программа представляется в форме

$$\theta_B \in [1, \theta_B^{\leftrightarrow \text{ТРДФ}}], (e_\Gamma, e_\Phi, F_\Phi) = var \Rightarrow (q_\epsilon, \theta_\Phi, \Sigma A) = const^{\alpha \leftrightarrow}$$

$$\theta_B \in [\theta_B^{\leftrightarrow \text{ТРДФ}}, \theta_B^\omega], (e_\Gamma, e_\Phi, F_\Phi) = var \Rightarrow (\theta_\Gamma, \theta_\Phi, \Sigma A) = const^{\leftrightarrow \omega}$$

где  $\theta_B^{\leftrightarrow \text{ТРДФ}}$  - температура торможения набегающего потока в точке изменения закона регулирования,

$$const^{\alpha \leftrightarrow} = (q_\epsilon^M, \theta_\Phi^M, 0), \quad const^{\leftrightarrow \omega} = (\theta_\Gamma^M, \theta_\Phi^M, 0).$$

- ◆ Полагается, что  $\theta_B^{\leftrightarrow}$  - величина, при которой формируется локально-оптимальный представитель ТРДФ:  $\theta_B^\phi \text{ ТРДФ} = \theta_B^{\leftrightarrow \text{ТРДФ}}$ , где  $\phi$  - индекс точки формирования остова. Формирование прототипа при уменьшенной величине температуры торможения набегающего потока означает: состояние функционирования ТРДФ при  $\theta_B = \theta_B^\omega$  будет не оптимальным, величина абсолютной тяги уменьшится и из-за уменьшения  $q_{\epsilon \text{ ТРДФ}}$ .

Из равенства удельных тяг

$$r^{JM}{}_{y\delta}(\theta_B^\omega \rightarrow \theta_B=1) = r^{JM}{}_{y\delta \text{ ТРДФ}}(\theta_B^{\leftrightarrow} \rightarrow \theta_B=1)$$

соответствующими подстановками можно вывести зависимость  $\theta_B^{\leftrightarrow \text{ТРДФ}}$  от  $\theta_B^\omega$ . Однако в приближенных оценках можно применить графический способ определения  $\theta_B^{\leftrightarrow}$ : по первой процедуре сравнений строятся зависимости

$$r^{JM}{}_{y\delta}(\theta_B^\omega \rightarrow \theta_B=1), \quad r^{JM}{}_{y\delta \text{ ТРДФ}}(\theta_B^\omega \rightarrow \theta_B=1);$$

задается значение  $\theta_B^\omega$ , находится значение  $r_{y\delta}(\theta_B=1)$ ; находятся точка пересечения с кривой  $r^{JM}{}_{y\delta \text{ ТРДФ}}(\theta_B^\omega \rightarrow \theta_B=1)$ , значение  $\theta_B^\omega$  этой кривой есть искомое значение  $\theta_B^{\leftrightarrow}$ . В рис. 4 изображены ожидаемые приближения зависимостей, последовательность определения значений величин отмечена жирными пунктирными стрелками. Подчеркивается:

$$q_{\epsilon \text{ ТРДФп}}^0 = q_{\epsilon \text{ ТРДФ}}(\theta_B^{\leftrightarrow \text{ТРДФ}}).$$

Основными операциями данной процедуры являются вывод локально-оптимального ТРДФ при  $\theta_B = \theta_B^{\leftrightarrow}$  в условия с  $\theta_B = \theta_B^\omega$ , определении величины относительной плотности тока на входе в его компрессор и сравнении там по абсолютной тяге с ТРДФпN.

При  $\theta_{\Gamma \text{ ТРДФ}} = const$  связи между величинами процессов в ТРДФ определяются условиями неизменности удельной работы сжатия газа в компрессоре,

$$\theta_{\text{КТРДФ}} - \theta_B = \theta_{\text{КТРДФ}}^0 - \theta_B^{\leftrightarrow \text{ТРДФ}},$$

где  $\theta_{\text{КТРДФ}}^0 = \theta_{\text{КТРДФ}}^{\leftrightarrow}$ , а также равенств расходов воздуха на входе в компрессор расходу газа на входе в турбину,

$$q_{\epsilon \text{ ТРДФ}} = q_{\epsilon \text{ ТРДФ}}(F_2/F_\epsilon)(p_\Gamma/p_B)(\theta_B/\theta_\Gamma)^{1/2},$$

$$q_{\epsilon}^0 = q_{\epsilon}^{\leftrightarrow} = q_{\epsilon}(F_2/F_\epsilon)(p_\Gamma/p_B)^{\leftrightarrow}(\theta_B^{\leftrightarrow}/\theta_\Gamma)^{1/2}$$



$$q_{\epsilon \text{ ТРДФ}}/q_{\epsilon}^0 = ((\theta_{\text{КТРДФ}}/\theta_B)/(\theta_{\text{КТРДФ}}^{\leftrightarrow}/\theta_B^{\leftrightarrow}))^{k/(k-1)}(\theta_B/\theta_B^{\leftrightarrow})^{1/2}.$$

Этих условий достаточно для вычисления отношения абсолютных тяг в точке  $\omega$ .

Продолжение примера, представленного в таблице 1:

$$\theta_{\text{КТРДФ}}^{\leftrightarrow} \approx 1,75, \quad q_{\epsilon} r^{JM}{}_{y\delta \text{ ТРДФ}}(1,75 \rightarrow 3)/(q_{\epsilon}^0 r^{JM}{}_{y\delta}(3)) \approx 2,65,$$

отношение абсолютных тяг увеличится более чем в 2,65 раза.

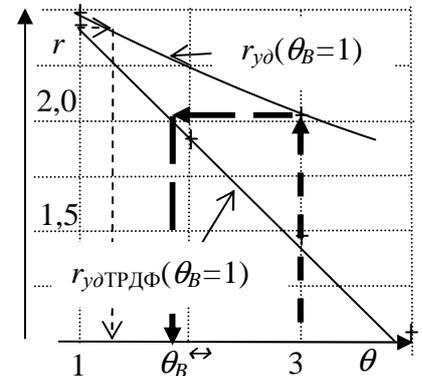


Рис. 4

Заключительной операцией является определение нижнего предела ее применения - минимального значения  $\theta_B^\omega$ , при котором сформированный ТРДФпN и приведенный в состояние с  $\theta_B = 1$  будет иметь тягу, равную тяге локально-оптимального ТРДФ, сформированного при  $\theta_B = 1$  (последовательность определения в рис. 4 отмечена тонкими пунктирными стрелками). Это - значение  $\theta_B^\omega$ , при котором ТРДФ будет регулироваться только законом  $\theta_T = const$ .

Пусть проектируется ЛА гражданской авиации. Результаты приближенных вычислений показывают, что с учетом ограничений взлета у ТРДФпN абсолютная тяга при расчетной скорости полета будет существенно больше, чем у ТРДФ. Это означает такой же уровень превосходства и по другим основным критериям совершенства ВРД. Дальность полета ЛА можно будет увеличить также существенно.

### 2.3. О возможностях увеличения температуры газа перед турбиной при уменьшенной скорости вращения ротора

При  $\theta_B \rightarrow 1$ ,  $n_{np} = const$  физическое число оборотов ротора турбокомпрессора уменьшается ( $n = n_{np}^\omega (\theta_B / \theta_B^\omega)^{1/2} \leq n^\omega$ ), структура ТРДФпN позволяет усовершенствовать программу регулирования учетом влияния вариаций  $n$  на максимально допустимую температуру газа перед турбиной. В определении ее предела при  $n < n^0$  можно допустить длительное (сопоставимое с временем функционирования форсажной камеры сгорания) превышение величины  $\theta_T^\omega$ , положить [1]

$$\theta_T^{[Mn]} = \theta_T^\omega + (1 - \theta_B / \theta_B^\omega)(\theta_\phi^\omega - \theta_T^\omega),$$

где  $\theta_T^{[Mn]}$  - верхний предел  $\theta_T$ , в котором учтена переменность физического числа оборотов ротора. В усовершенствованной программе эта величина заменяет величину  $\theta_T^{[M]}$ . Поскольку и расход воздуха через обводной контур будет увеличиваться, то увеличение отношения взлетных тяг будет еще более существенным.

### Заключение

- Высокий уровень термодинамической эффективности – позитивный фактор дискретного преобразования тепловой энергии в механическую энергию.
- Дискретное продвижение газа через поршневую подсистему сверхзвукового ВРД обуславливает весовое, габаритное несовершенство этой подсистемы, это - негативный фактор высшей степени существенности.
- Имеются возможности увеличения средней скорости движения газа в поршневой подсистеме, позволяющие ослабить негативный аспект дискретного движения.
- Ввод в ВРД с турбокомпрессорной основой поршневой подсистемы, расход газа через которую в проектной точке движения ЛА меньше расхода газа через турбину, целесообразен.
- Специфика дискретного движения газа в поршневой подсистеме, элементы которой используются в качестве элементов подсистемы автоматического регулирования, позитивна. Возмущения от процессов, протекающих в замкнутых емкостях с камерами сгорания, вверх по потоку не передаются, появляются возможности повышения эффективности программы регулирования вспомогательным регулированием при условиях неизменности состояний потоков перед турбиной и в обводном канале.
- При неизменности состояния потока на выходе из компрессора возможно варьирование расхода воздуха через обводной канал, предварительные оценки показывают, что его влияние может быть более чем значительным.
- Примеры формальных оценок прототипа, подтипа с поршневой подсистемой показывают: при приведении остовов во взлетные условия функционирования ожидается увеличение тяги в  $\approx 1,47$  раза; при заданном ограничении взлетной тяги, при выравнива-

нии взлетных тяг средствами регулирования прототипа и обратном приведении вариантов в проектную точку движения ЛА ожидается увеличение тяги в  $\approx 2,65$  раза.

- Имеются возможности повышения эффективности программы регулирования увеличением числа вспомогательных регулирующих факторов.
- Инициация затратного подробного моделирования, уточнения оценок в ближайшей перспективе целесообразна.

### Литература

1. Жуков А.Н. О виртуальной структуре двигателя для сверхзвуковой авиации. ВЦ РАН, 2013.
2. Жуков А.Н. О виртуальных двухконтурных двигателях с агрегатами дискретного действия. ВЦ РАН, 2013.
3. Жуков А.Н. Авиационные двигатели: принципы формирования и моделирования виртуальных структур. ВЦ РАН, 2013.