

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

---

*СООБЩЕНИЯ ПО ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКЕ*

**А.Н. ЖУКОВ**

**ДВИГАТЕЛИ СВЕРХЗВУКОВОЙ АВИАЦИИ:  
ВИРТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С РЕГУЛЯЦИЕЙ  
НАГНЕТАНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА**

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

УДК 621.45:519. 816:629.782.03

Исследуются варианты регулирования механического сжатия воздушного потока с целью повышения интегральной эффективности функционирования сверхзвукового летательного аппарата на траектории.

*Научное издание*

ФГ БУН

© Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

В теории воздушно-реактивных двигателей (ВРД) [1 - 3] представлены основные аспекты проблем построения, специфики функционирования и регулирования механизмов сжатия воздушного потока перед подводом тепловой энергии топлива. Проблемы представляются на подуровнях первого уровня описаний теории – уровня «завязки» проекта практического проектирования. В частности, обобщения построений и испытаний осевых компрессоров предыдущих поколений показывают:

1. В окрестности *расчетной точки* компрессора его функционирование устойчиво, уровень эффективности близок к технически достижимому высокому уровню, процесс сжатия потока не регулируется.
2. Требования гарантированного запуска, вывода компрессора в расчетную точку определяют *диапазон рабочих режимов* его функционирования.
3. При неизменном статоре, роторе высоконапорного *многоступенчатого* компрессора в диапазоне рабочих режимов имеет место под-диапазон недопустимых режимов, в которых происходят срывы потока в обтекании профиля лопаток, колебания давления большой амплитуды («помпаж» компрессора).
4. Основная цель регулирования компрессора заключается в обеспечении устойчивого процесса сжатия во всем диапазоне функционирования.
5. Устойчивость сжатия в переменных условиях может быть обеспечена поворотами лопаток спрямляющего (направляющего) аппарата в нескольких ступенях.
6. Функционирование средненапорных, низконапорных компрессоров устойчиво во всем рабочем диапазоне.
7. На фоне проблемы формирования рационального компрессора любого напора иные аспекты регулирования не актуальны.

В настоящей работе основное внимание уделено вариантам ВРД с компрессорами среднего, низкого напора (авиация значительных сверхзвуковых скоростей полета), т.е. тем вариантам, в которых нет проблемы устранения отмеченных «помпажных» режимов. Ставится

*иная цель регулирования механического сжатия воздушного потока:  
повышение уровня эффективности системы автоматического регулирования ВРД на множестве всевозможных состояний функционирования сверхзвукового летательного аппарата (ЛА).*

Поскольку для сверхзвукового продвижения ЛА требуются режимы максимальной тяги ВРД и близкие к нему режимы, то регулирование компрессора становится актуальным именно в окрестности его расчетной точки. Безусловно, изменение назначения регуляции, существенное ограничение максимального расчетного напора компрессора, более высокий уровень современных технологий открывают возможности дальнейшей механизации тракта сжатия потока.

Очевидно, объективно оценить перспективы иного регулирования можно только при представлении его в рамках целостной системы, а показать суть расширенной программы автоматического регулирования проще всего на максимально агрегированном уровне описаний теории. Здесь, некоторые аспекты проблемы регулирования процесса механического сжатия выносятся в сферу формирования и исследования возможностей предельных абстракций двигателестроения.

Прототипами виртуальных подтипов являются подтипы турбореактивного двигателя (ТРД), ТРД с форсажной камерой сгорания (ТРДФ), регулируемых традиционными законами неизменности приведенного числа оборотов ротора, температуры газа перед турбиной. Регулирование процесса сжатия – вспомогательное средство повышения эффективности кардинальных законов. Из априорного совместного анализа ограничений традиционного регулирования и потенциальных возможностей воздействия на процесс сжатия варьированием площадей протока сжимаемого потока следует, что рациональными могут

быть подтипы двухконтурного ВРД относительно небольшой степени двухконтурности, которые вырождаются в одноконтурные подтипы при выходе в состояние функционирования с максимальной тягой при большой энергии набегающего потока.

Отмечаются основные положения формальных процедур формирования и сравнений возможностей конкурирующих абстракций.

- Разновидность ВРД, отличающаяся от других разновидностей ВРД по крайней мере программой регулирования, называется «подтип», обозначается ВРД<sub>n</sub> ( $n = 0, 1, \dots$ ).
- Остов ВРД<sub>n</sub> формируется по условию достижения максимума тяги в точке движения ЛА с проектной сверхзвуковой скоростью.
- Исходной (корректируемой) программой регулирования режимов максимальной тяги полагается закон неизменности приведенного числа оборотов ротора проектом диапазоне по температуре торможения набегающего потока (подтип ВРД<sub>0</sub>).
- На траектории движения площадь протока газа на входе в турбину неизменна.
- С учетом прогноза ограничений более подробных уровней описания формируются варианты регуляции сжимаемого потока. Моделируются связи величин процесса производства тяги.
- Варьирование площадей протока газа в компрессорах рассматривается как вспомогательное средство повышения эффективности кардинального закона регулирования.
- Формируются расширенные программы регулирования.
- Принимается: сравнительные стартовые возможности вариантов удовлетворительно аппроксимируют функционирования этих вариантов при нулевой скорости полета при проектной высоте.
- Конкурирующие абстракции по своим программам регулирования «приводятся» в точку движения ЛА с нулевой скоростью и в ней сравниваются по тяге.

Ожидается: абстрагированные программы регулирования станут ориентирами формирования «виртуально реальных» программ.

## **1. О регуляторах сжатия потока**

### **1.1. Предварительные замечания, представление исследуемых способов регулирования**

Уровень эффективности сжатия потока компрессором, функционирующем вблизи «помпажного» состояния, высок.

Традиционно регулируемый многоступенчатый компрессор – это нерегулируемый ротор и статор с относительно небольшими подвижными элементами.

Повороты лопаток направляющего аппарата первой ступени компрессора изменяют и площадь входа (расход воздуха), и степень повышения давления газа в ступени. Те вариации положения лопаток, которые уменьшают площадь входа, уменьшают осевую скорость потока и увеличивают степень повышения давления. С увеличением степени повышения давления относительно характеристики нерегулируемого компрессора устойчивое течение приближается к «помпажному» течению. При значительном увеличении площади входа относительно расчетной площади коэффициент полезного действия (КПД) компрессора приближается к неприемлемо малому значению.

При не дробящемся потоке в компрессоре вариация расхода воздуха в первой ступени независимо от условий регуляции последующих ступеней изменяет их степень повышения давления вследствие изменения осевой скорости потока. Сила воздействия вариации расхода воздуха в первой ступени на степень повышения давления каждой из последующих ступеней примерно такая же, как и на степень повышения давления первой ступени.

На траектории уровень интегральной эффективности компрессора тем ниже, чем больше диапазон по температуре торможения набегающего потока. Такая зависимость есть следствие неизменности остова. Трансформировать остов рационально (оптимально)

под изменяющиеся состояния набегающего потока крайне сложно. Следовательно, на нерасчетные режимы функционирования основное влияние будет оказывать остов компрессора, как правило, проектный диапазон по температуре торможения набегающего потока будет включать под-диапазон, в котором компрессор – регулируемый объект, и, по крайней мере, один под-диапазон, в котором он нерегулируемый объект.

Повороты лопаток направляющего (спрямляющего) аппарата ступеней компрессора, остов которого не нуждается в обеспечении устойчивых течений, могут породить как неустойчивое течение, так и устойчивое течение с неприемлемо низкой эффективностью сжатия.

Следует ожидать: чем больше будут возможности трансформирования компрессора на траектории, тем будут выше уровни интегральной *терморепактивной* эффективности и экологии эксплуатации авиации. Основные негативные следствия расширения возможностей: усложняется проблема обеспечения безопасности функционирования; увеличиваются затраты ресурсов в проектировании и промышленном изготовлении изделий.

Формируются фрагменты системы автоматического регулирования ВРД – основа разнообразных вариантов виртуальной подсистемы регулирования компрессора.

### 1. Допускается

*варьирование положениями всех, и статорных, и роторных лопаток.*

Механизм поворотов вращающихся лопаток ротора, например, может быть аналогичным механизму поворота лопастей винта винтомоторной установки.

Совместная регуляция статорных, роторных лопаток позволяет:

изменять степень повышения давления газа в компрессоре при неизменности его площади входа;

изменять площадь входа газа в компрессор при неизменности его степени повышения давления;

значительно увеличить силу воздействия варьируемых элементов на суммарную степень повышения давления и тем самым расширить диапазон приемлемо эффективной и устойчивой регуляции состояний потока на выходе из компрессора;

расширить диапазон приемлемо эффективной и устойчивой регуляции площади входа;

несколько увеличить значения КПД компрессора при нерасчетных положениях лопаток из окрестности их расчетных положений.

### 2. Отмечаются ожидаемые последствия регуляции положений лопаток:

на траектории движения ЛА все лопатки компрессора оказались в предельно допустимом положении, течение потока предельно близко к неустойчивому течению;

в рамках принятой концепции проекта ЛА желательно повысить уровень интегральной эффективности системы автоматического регулирования ВРД дополнительными средствами механизации воздушного тракта компрессора.

Принимается: в конструкцию введены бандажные кольца, способные перемещаться вдоль лопаток в радиальном направлении и образовывать подвижный фрагмент *обобщенного* (в смысле не включающего в себя поверхности лопаток) контура протока воздуха (рис. 1). В рамках компрессора цель такого регулирования заключается в изменениях площади входа при предельных положениях лопаток. Суть воздействий в регулировании в целом описывается в формах вариантов программы регулирования ВРД.

В регулировании средством трансформации контура сжимаемого потока имеет место жесткое ограничение: запас устойчивости течения относительно неустойчивого течения не может быть меньше гарантированной величины. Кроме того, имеет место побоч-

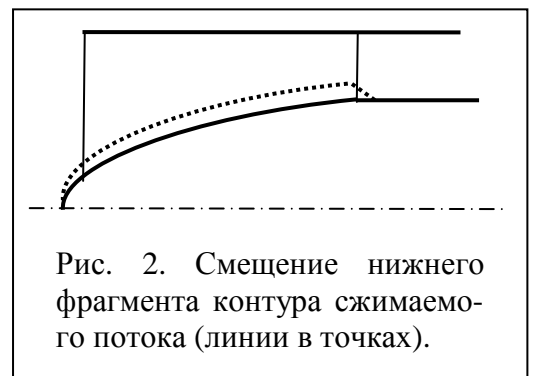


Рис. 2. Смещение нижнего фрагмента контура сжимаемого потока (линии в точках).

ный эффект: и при неизменной скорости вращения ротора вариация контура исключением-подключением элементарных струй изменяет осредненную скорость потока. Следствие: степень повышения давления зависит от вариаций контура. Например, при смещении нижнего фрагмента контура (рис. 1) к периферии значение степени повышения давления увеличится. При условии неизменности суммарной степени повышения давления этот эффект позволяет локальными вариациями контура несколько увеличить значения КПД ступеней.

Подчеркивается:

острота проблемы обеспечения взлета ЛА с ВРД, регулируемого законом неизменности приведенного числа оборотов ротора, относительно небольшое число ступеней компрессора (его остов – результат формирования при набегающем потоке со значительной сверхзвуковой скоростью), позволяют ставить вопрос о внедрении инновационных подсистем его регулирования в практику построения образцов ВРД ближайшего поколения.

## 1.2. О связях величин

### в вариантах программы регулирования

Для формальных оценок предельно абстрактных целостных программ регулирования ВРД необходимо выразить фундаментальные положения регулирования, достаточно обозначить *обобщенные регулирующие факторы*, пределы их изменения и выразить тягу функцией от обобщенных факторов.

Отмечаются первые возможные варианты воздействия совокупности регуляторов сжатия потока, примерные упрощения цепочек воздействия и обобщений регулирующих факторов.

- I. Вариант I подсистемы регулирования компрессора заключается в изменении суммарной степени повышения давления газа вариациями положений лопаток при неизменности площади входа простейшим механизмом. В этом варианте положения всех лопаток статора неизменны, повороты (некоторых, всех) роторных лопаток связаны условием равенства углов поворота. Суммарная степень повышения давления есть функция от этого общего угла поворота, в подробной программе регулирования ВРД он является регулирующим фактором. Что же касается предельной абстракции регулирования ВРД, то ее обобщенный регулирующий фактор есть отношение температуры газа за компрессором к температуре при входе в компрессор. Это отношение связано со степенью повышения давления условием изоэнтропийного изменения состояния потока.
- II. Вариант I корректируется следующим образом: положения лопаток первой ступени неизменны; положения роторных лопаток остальных ступеней варьируются так же, как и в варианте I; статорные лопатки регулируются по условию неизменности углов атаки роторных лопаток. Результат: обобщенный регулирующий фактор – прежний, корректируются пределы изменения.
- III. Вариант III регулирования компрессора: при неизменности положений всех лопаток изменяется площадь входа перемещениями нижнего фрагмента контура сжимаемого потока; механизм перемещений – профиль фрагмента корректируется так, чтобы суммарная степень повышения давления газа оставалась неизменной. И в подробной, и в агрегированной программе регулирования ВРД регулирующим фактором является площадь входа.
- IV. Вариант III корректируется следующим образом: изменяется положение исходной точки профиля (в сечении входа в компрессор); профиль трансформируется по условию равенства суммарной степени повышения давления максимальному значению. Результат: регулирующий фактор – прежний; в подробной программе регулирования ВРД суммарная степень повышения давления есть функция от площади входа; в агрегированной программе регулирования ВРД приращением степени повышения давления можно пренебречь, пределы изменения площади входа корректируются.

V. Возможности регулирования по варианту I исчерпаны, но возможны такие изменения положений лопаток, при которых изменяются и суммарная степень повышения давления, и площадь входа. В предельной абстракции такое регулирование описывается как можно простой аппроксимацией связи между площадью входа и отношением температуры газа за компрессором к температуре при входе в компрессор.

Таким образом, предварительный анализ, примеры показывают, что в описаниях предельных абстракций необходим учет пределов варьирования регулирующих факторов, но возможность варьирования значений собственно пределов целесообразно использовать как средство прогнозов совершенства этих абстракций.

## 2. Формализация формирования остова, функционирования корневого прототипа

Прототип:

- ⊙ ТРДФ нерегулируемым компрессором, с системой автоматического регулирования (САР) законом неизменности приведенного числа оборотов ротора во всем диапазоне по температуре торможения набегающего потока (ТРДФ0);
- ⊙ остов формируется в точке движения ЛА с проектной сверхзвуковой скоростью по условию производства максимальной тяги;
- ⊙ при функционировании внутри диапазона по температуре торможения набегающего потока кроме ротора подвижными элементами конструкции являются лишь поверхности, ограничивающие реактивную струю в сопле.

### 2.1. Формирование оптимального остова

Вводится система обозначений, которую, в частности, можно получить трансформацией системы обозначений [4]:

$R, E_i, V_i, T_i, B_i, F_i, p_i, q_i, c_p$  – соответственно тяга, расход тепловой энергии топлива, скорость, абсолютная температура, расход газа, площадь протока, давление, относительная плотность тока, удельная теплоемкость газа при постоянном давлении,  $i$  – сечение потока (рис. 2),

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

$H, \varepsilon, z, \phi, C$  – индексы состояний потока в движении,  $\varepsilon$  – на входе в компрессор,  $z$  – на входе в турбину,  $\phi$  – в критическом сечении сопла.

При изобарном подводе-отводе тепловой энергии основные равенства имеют вид

$$\begin{aligned} B_i &= B_H, \\ E &= E_\Gamma + E_\Phi = c_p B_H (T_\Gamma - T_K + T_\Phi - T_T), \\ R &= B_H (V_C - V_H) = B_H \{ [2c_p (T_\Phi - T_C)]^{1/2} - [2c_p (T_B - T_H)]^{1/2} \}, \\ T_K - T_B &= T_\Gamma - T_T, \\ (\oint \delta E/T) &= 0 \Rightarrow T_K/T_H = (T_\Gamma/T_T)(T_\Phi/T_C), \end{aligned}$$

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

В безразмерных величинах равенства, ограничения-неравенства имеют вид

$$\begin{aligned} r &= r_{y0} = v_C - v_H = (\theta_\Phi - \theta_C)^{1/2} - (\theta_B - 1)^{1/2}, \\ e_\Gamma + e_\Phi &= \theta_\Gamma - \theta_K + \theta_\Phi - \theta_T, \\ \theta_K - \theta_B &= \theta_\Gamma - \theta_T, \\ \theta_K - (\theta_\Gamma/\theta_T)(\theta_\Phi/\theta_C) &= 0, \\ e_i &> 0, \quad 1 \leq \theta_B < \theta_K < \theta_\Gamma \leq \theta_\Gamma^M, \\ \theta_T &\leq \theta_\Phi \leq \theta_\Phi^M, \quad q_e \leq q_e^M, \end{aligned}$$

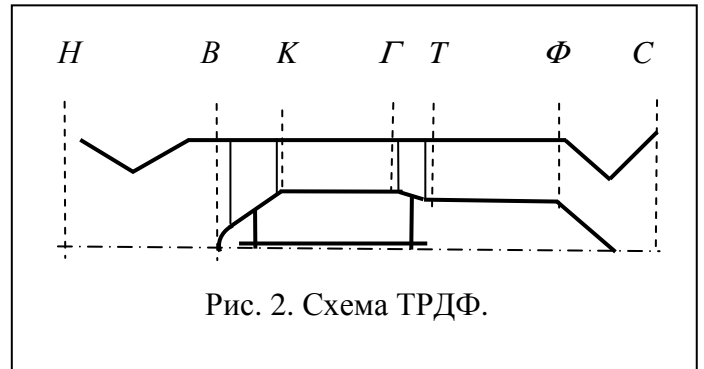


Рис. 2. Схема ТРДФ.

где  $r, r_{y0}, v_j, \theta_j, e_j$  – безразмерные тяга, удельная тяга, скорость, температура, расход тепловой энергии топлива,  $^M$  - индекс максимальной величины,

$$R = r(2c_p T_H)^{1/2} B_H, \quad V_j = v_j(2c_p T_H)^{1/2}, \\ T_i = \theta_i T_H, \quad E_i = e_i c_p T_H B_H.$$

Ставится задача достижения максимума тяги. Оптимальный остов определяется соотношениями

$$\theta_\Gamma = \theta_\Gamma^0 = \theta_\Gamma^M, \quad \theta_\Phi = \theta_\Phi^0 = \theta_\Phi^M, \\ \theta_K = \theta_\Gamma = \theta_K^0 = \theta_\Gamma^0 = (\theta_\Gamma + \theta_B)/2, \\ q_\varepsilon = q_\varepsilon^0 = q_\varepsilon^M, \quad n = n^0 = n^M, \quad n_{np} = n_{np}^0 = n_{np}^M,$$

где индексом  $^0$  помечены оптимальные величины,  $n$  - число оборотов ротора,  $n_{np}$  - приведенное число оборотов ротора.

## 2.2. Связи величин в нерасчетных режимах функционирования

Программа регулирования максимальных режимов представляется в виде

$$(e_\Gamma, e_\Phi) = \mathbf{var}, \quad \theta_B \in [1, \theta_B^\omega] \\ \Downarrow \Downarrow$$

$$(q_\varepsilon, \theta_\Phi) = \mathbf{const} = (q_\varepsilon^\omega, \theta_\Phi^\omega),$$

где величины, варьируемые САР, обозначены  $\mathbf{var}$ ,  $\omega$  - точка движения ЛА с проектной энергией набегающего потока, контролируемые предельные величины обозначены  $\mathbf{const}$ ,

$$(q_\varepsilon, \theta_\Phi)^\omega = (q_\varepsilon, \theta_\Phi)^0,$$

условием  $F_\phi = \mathbf{var}$  обеспечивается изобарный подвод дополнительной тепловой энергии.

Подчеркивается:

САР выдерживает подобие температур турбокомпрессора,

$$q_\varepsilon = \mathbf{const} \Rightarrow (\theta_i/\theta_B) = \mathbf{const} = (\theta_i^\omega/\theta_B^\omega), \quad i = K, \Gamma, T, \\ \theta_i^\varepsilon = \theta_i^\omega \theta_B/\theta_B^\omega,$$

где  $^\varepsilon$  - индекс подобной температуры;

САР выдерживает неизменность приведенной скорости вращения ротора,

$$q_\varepsilon = \mathbf{const} \Rightarrow n_{np} = \mathbf{const} = n(\theta_B/\theta_B^\omega)^{1/2};$$

позитивное следствие регулирования: максимум тяги при проектируемом максимальном аэродинамическом сопротивлении ЛА;

негативные следствия регулирования:

$$\theta_B < \theta_B^\omega \Rightarrow \theta_i^\varepsilon < \theta_i^\omega,$$

тяга при взлете существенно уменьшается;

максимальная тяга внутри  $[1, \theta_B^\omega]$  определяется формулой

$$r = [\theta_\Phi^\omega (1 - \theta_B^\omega \theta_\Gamma^\omega / (\theta_B \theta_K^\omega \theta_\Gamma^\omega))]^{1/2} - v_H.$$

## 3. Примерные коррекции исходной программы регулирования, оценки

В формах программ, в процедурах вычисления определяемыми этими программами величин условия функционирования прототипа, названные режимами подобия по температурам турбокомпрессора, используются в качестве *опорных режимов*.

Примерные коррекции - это простейшие коррекции из состава допустимых коррекций программ регулирования.

### 3.1. Первая коррекция

Корректируется прототип программы регулирования (формируется подтип ТРДФ1): площадь входа в компрессор по-прежнему неизменна, вводится вспомогательный регулирующий фактор

$$\theta_{KB} = \theta_K/\theta_B, \\ \theta_{KB}, \theta_{KB}^\omega \in [\theta_{KB}^m, \theta_{KB}^M], \quad \theta_{KB}^m < \theta_{KB}^M,$$

контролируется температура газа перед турбиной условием

$$\theta_\Gamma = \mathbf{const} = \theta_\Gamma^\omega$$



в окрестности проектной точки.

Принимается: диапазон  $[\theta_{KB}^m, \theta_{KB}^M]$  относительно мал, в окрестности взлета ЛА возможности регулирования компрессора исчерпаны, он нерегулируем. Форма программы имеет вид

$$\begin{array}{ccc} (e_\Gamma, e_\Phi) = \mathbf{var}, \theta_B \in [1, \theta_B^\omega] & & \\ \Downarrow \Downarrow & & \\ (q_e, \theta_\Phi) = \mathbf{const} = (q_e^\omega, \theta_\Phi^\omega) & & \\ \theta_B \in [1, \theta_B^K] & & \theta_{KB} = \mathbf{var}, \theta_B \in [\theta_B^K, \theta_B^\omega] \\ \Downarrow & & \Downarrow \\ \theta_{KB} = \mathbf{const} = \theta_{KB}^M & & \theta_\Gamma = \mathbf{const} = \theta_\Gamma^\omega, \end{array}$$

где полужирным шрифтом стрелок подчеркнуто главенство корневого закона регулирования,  $K$  – индекс точки включения-выключения регуляторов сжатия.

Допустимая вариация  $\theta_K$  определяется условиями равенства относительной плотности тока, площади протока и расходов газа на входе в турбину ТРДФ0, ТРДФ1, которые выражаются в параметрах торможения потока,

$$B_i = q_i F_i p_i / T_i^{1/2} \hat{C}, \quad i = z, I = \Gamma,$$

где  $\hat{C}$  – параметр, зависящий лишь от физических свойств идеального газа с постоянными теплоемкостями, в описании ТРДФ0  $T_\Gamma = T_\Gamma^{\text{ср}}$ , в описании ТРДФ1  $T_\Gamma = T_\Gamma^\omega$ .

В расчетах тяга определяется формулой

$$r = [\theta_\Phi^\omega (1 - \theta_\Gamma / (\theta_K \theta_\Gamma))]^{1/2} - v_H,$$

процедура вычисления  $\theta_\Gamma, \theta_K, \theta_\Gamma$  во всем диапазоне  $[1, \theta_B^\omega]$  имеет вид:

При  $\theta_B \in [\theta_B^K, \theta_B^\omega]$ :

$$\begin{array}{l} \theta_\Gamma = \theta_\Gamma^\omega, \\ \theta_K = \theta_K^{\text{ср}} (\theta_\Gamma^\omega / \theta_\Gamma^{\text{ср}})^{(k-1)/(2k)}, \\ k = c_p / c_v, \text{ - теплоемкость в изохорном процессе,} \\ \theta_\Gamma = \theta_\Gamma^\omega - \theta_K. \end{array}$$

При  $\theta_B \in [1, \theta_B^K]$ :

по предыдущим формулам вычисляются величины в точке  $K$ , затем -

$$\theta_I = \theta_I^K \theta_B / \theta_B^K, \quad I = K, \Gamma, T.$$

Выводы:

Из формальных аппроксимаций связей следует: при  $\theta_B \in (1, \theta_B^\omega]$

$$r_{\text{ТРДФ0}} < r_{\text{ТРДФ1}},$$

$$j_{\text{ТРДФ0}} < j_{\text{ТРДФ1}},$$

где  $j$  – импульс тяги по тепловой энергии топлива,

$$j = r / (e_\Gamma + e_\Phi),$$

чем больше диапазоны регулирования компрессора и по температуре торможения набегающего потока, тем предпочтительнее ТРДФ1.

### 3.2. Вторая коррекция

Подчеркивается кардинальная причина ограничения температуры газа перед турбиной, отмечается специфика программы регулирования ТРДФ1.

- ① Величина  $\theta_\Gamma^M$  определяется гарантированным запасом прочности вращающихся лопаток турбины в точке формирования остова.
- ① С уменьшением кинетической энергии набегающего потока давление газа на лопатки турбины уменьшается.
- ① В скорректированной программе сохраняется следствие

$$q_e = \mathbf{const} \Rightarrow n_{np} = \mathbf{const}.$$

- ① С уменьшением физической скорости вращения ротора центробежные силы уменьшаются, запас прочности вращающихся лопаток увеличивается.
- ① Увеличивающийся запас прочности конструкции позволяет ставить вопрос об увеличении температуры газа перед турбиной на траектории до значений, превышающих величину  $\theta_\Gamma^M$ .

- ⊙ В рамках исходной программы регулирования величину  $\theta_T^{\omega}$  изменить невозможно, при регулируемом компрессоре – возможно и до значений, превышающих величину  $\theta_T^M$ .

Вторая коррекция заключается в учете влияния вариаций  $n$  на максимально допустимую температуру газа перед турбиной. В определении предела при  $n < n^M$  можно допустить длительное (сопоставимое по длительности функционирования форсажной камеры сгорания) превышение величины  $\theta_T^M$ . Реальную зависимость температуры газа во вращающихся каналах от центробежных сил вращения ротора (квадратичная зависимость от скорости вращения) при заданном пределе прочности лопаток турбины можно аппроксимировать линейной функцией от коэффициента подобия температур турбокомпрессора (текущая скорость вращения ротора пропорциональна корню квадратному из коэффициента подобия температур турбокомпрессора). Постоянные линейной функции можно определить следующим образом: при функционировании в точке формирования остова максимальная температура есть  $\theta_T^M$ , при функционировании с гипотетической нулевой скоростью вращения ротора ( $\theta_B = 0$ ) она равна максимальной температуре газа форсирования. При принятых условиях формирования остова ( $\theta_T^M = \theta_T^0 = \theta_T^{\omega}$ )

$$\theta_T^{[Mn]} = \theta_T^0 + (1 - \theta_B/\theta_B^{\omega})(\theta_T^0 - \theta_T^{\omega}),$$

где  $\theta_T^{[Mn]}$  - верхний предел  $\theta_T$  на траектории.

Программа регулирования подтипа ТРДФ2 принимает вид

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

$$\Downarrow \Downarrow$$

$$(q_B, \theta_{\phi}) = \mathbf{const} = (q_B^{\omega}, \theta_{\phi}^{\omega})$$

$$\theta_B \in [1, \theta_B^K]$$

$$\Downarrow$$

$$\theta_{KB} = \mathbf{const} = \theta_{KB}^M$$

$$\theta_{KB} = \mathbf{var}, \theta_B \in [\theta_B^K, \theta_B^{\omega}]$$

$$\Downarrow$$

$$\theta_T/\theta_T^{[Mn]} = \mathbf{const} = 1.$$

Процедура вычисления  $\theta_T$ ,  $\theta_K$ ,  $\theta_T$  есть процедура вычисления величин ТРДФ1, в которой вместо  $\theta_T^{\omega}$  подставляется величина  $\theta_T^{[Mn]}$ .

Выводы: при  $\theta_B \in (1, \theta_B^{\omega})$

$$r_{\text{ТРДФ1}} < r_{\text{ТРДФ2}}, \quad j_{\text{ТРДФ1}} < j_{\text{ТРДФ2}}.$$

### 3.3. Третья коррекция

Корректируется программа регулирования ТРДФ0 возможностью варьирования площади входа в компрессор при неизменности подобной температуры потока на выходе из компрессора (ТРДФ0 → ТРДФ3). Такое варьирование может быть осуществлено двумя, оцениваемыми с позиций формирования предельных абстракций как легко реализуемыми, способами: 1) изменениями положений лопаток направляющего аппарата компрессора с соответствующими изменениями положений статорных, роторных лопаток промежуточных ступеней; 2) вариациями контура сжимаемого потока при неизменности положений всех лопаток компрессора.

Анализируется качество влияния вариаций площади входа в компрессор.

- ⊙ Пусть в точке формирования остова  $\omega$  ТРДФ3 переводится в нерасчетный режим увеличением значения  $F_e$ . Для увеличения расхода газа через турбину при неизменности ее площадей протока потребуется уменьшить температуру потока, т.е. перевести двигатель в дроссельный режим. Но: 1) в экономичном понижении тяги вначале уменьшается температура форсирования; 2) дроссельные режимы тут не рассматриваются.
- ⊙ Прототип в опорном режиме «приводится» в окрестность условий взлета, затем уменьшается площадь входа в компрессор.
- ⊙ Тяга прямо пропорциональна расходу потока, расход уменьшается, но уменьшение абсолютной тяги не очевидно.
- ⊙ Состояние потока в компрессоре неизменно, температура, относительная плотность тока на входе в турбину уменьшаются.

- ⊙ Из выражения расхода через параметры торможения потока на входе в турбину следует, что при неизменности относительной плотности тока значение  $F_\phi < F_\phi^\omega$  будет определять единственное значение  $\theta_T^f > \theta_T^\omega$ .
- ⊙ Температура, давление газа на выходе из турбины увеличатся, КПД процесса, удельная тяга увеличатся.
- ⊙ При большой энергии набегающего потока ( $\theta_B^\omega \rightarrow \theta_T^\omega$ ) степень повышения давления газа в компрессоре мала ( $\theta_{KB}^\omega \rightarrow 1$ ). При таких условиях не исключено, что с уменьшением площади входа в компрессор (с увеличением давления газа перед соплом на фоне его малости при взлете) абсолютная тяга увеличится.

Корректируются формулы перехода к безразмерным величинам – расход воздуха выражается в величинах торможения набегающего потока, тяга относится к выражению расхода, в котором площадь входа в компрессор равна проектному значению. Выражение безразмерной тяги принимает вид

$$r = r_f = f_\phi \{ [\theta_\phi (1 - \theta_T / (\theta_K \theta_T))]^{1/2} - v_H \},$$

$$f_\phi = F_\phi / F_\phi^\omega, \theta_T = \theta_T(f_\phi), \theta_K = \theta_K^\omega, \theta_T = \theta_T(f_\phi).$$

где  $r_f$  - тяга с изменяемой площадью входа.

Из выражений расходов газа при неизменности относительной плотности тока в опорном режиме и режиме с вариацией  $f_\phi$ , следует

$$f_\phi = (\theta_T^\omega / \theta_T)^{1/2}.$$

Полагается:

$$f_\phi \in (0, 1].$$

Выписывается тяга в функции от  $f_\phi$ ,

$$r_f = f_\phi \{ [\theta_\phi (1 - \theta_T^\omega / (\theta_K^\omega (\theta_T^\omega - f_\phi^2 (\theta_K^\omega - \theta_B^\omega))))]^{1/2} - v_H \},$$

отмечаются условия увеличения тяги варьированием  $f_\phi$ .

- ⊙ Исследуется производная

$$\partial r_{\text{ТРДФЗ}} / \partial f_\phi.$$

Точка включения-выключения регуляторов компрессора определяется равенством производной нулю при  $f_\phi = 1$ . В проектной точке значение производной положительно, увеличение  $f_\phi$  переводит двигатель в дроссельный режим, в режиме максимальной тяги компрессор не регулируется.

- ⊙ Существуют такие значения  $\theta_\phi^\omega$ ,  $\theta_T^\omega$ ,  $\theta_K^\omega$ ,  $\theta_B^\omega$ , что при приведении ТРДФЗ в условия взлета значение производной будет отрицательно, с уменьшением  $f_\phi$  тяга будет увеличиваться.
- ⊙ Проектный диапазон по температуре торможения набегающего потока, на котором регуляция компрессора не увеличивает тягу опорного режима, определяется условиями

$$\partial r_{\text{ТРДФЗ}} / \partial f_\phi = 0, f_\phi = 1, \theta_B = 1.$$

Пусть диапазон  $[1, \theta_B^\omega]$  содержит под-диапазон с регулируемой площадью входа в компрессор,  $f_\phi \in (0, 1]$ , что означает: величина  $\theta_T^f = \theta_T^\omega$  достижима при  $\theta_B = 1$ , под-диапазон с нерегулируемой площадью входа – единственный. Тогда форма программы будет иметь вид

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

$$\Downarrow \Downarrow$$

$$(q_\phi, \theta_\phi) = \text{const} = (q_\phi^\omega, \theta_\phi^\omega)$$

$$f_\phi = \text{var}, \theta_B \in [1, \theta_B^\omega]$$

$$\Downarrow$$

$$\theta_T = \text{const} = \theta_T^\omega$$

$$\theta_B \in [\theta_B^\omega, \theta_B^\omega]$$

$$\Downarrow$$

$$f_\phi = \text{const} = 1,$$

где  $^\omega$  – индекс точки включения-выключения регулирования компрессора. Отмечается - и при таком варианте регулирования на траектории возможно увеличение температуры газа перед турбиной до значений  $\theta_T^{[Mn]} > \theta_T^M$ . Процедура вычисления величин ТРДФЗ очевидна, выводы: при отмеченных ограничениях

$$r_{\text{ТРДФЗ}} < r_{\text{ТРДФЗ}}, \quad j_{\text{ТРДФЗ}} < j_{\text{ТРДФЗ}}.$$

#### 4. О вариантах совместной коррекции программы регулирования и схемы течения

Обсуждаются варианты ВРД, схема которых позволяет средствами регулирования переходить от одноконтурной схемы к двухконтурной схеме и наоборот. Названием вариантов «ТРДФ с обводным каналом (ТРДФО)» подчеркивается специфика назначения второго контура.

##### 4.1. Первый вариант регулирования двигателя с обводным каналом

Специфика формирования 1-го варианта (ТРДФО1).

- ④ В точке формирования у идеального ТРДФО1 остов такой же, что и у идеального ТРДФ0.
- ④ На траектории компрессор ТРДФО1 полагается состоящим из первой (по движению потока) и второй секций. Состояние потока в 1-й секции не регулируется, 2-я секция может регулироваться варьированием площади входа в нее при неизменности подобной температуры на выходе из компрессора. Исследования возможностей ТРДФ3 показывают: площадь входа во 2-ю секцию будет меньше проектной величины.
- ④ В конструкцию вводится обводной контур для отвода разности расходов воздуха через секции в расположенную за турбиной камеру смешения (рис. 3).
- ④ Граница разделения секций компрессора предполагается варьируемой.
- ④ Цель трансформирования «ТРДФ3 → ТРДФО1» заключается в нивелировании негативного аспекта влияния на тягу регуляции компрессора ТРДФ3 – уменьшения расхода воздуха через ТРДФ3.

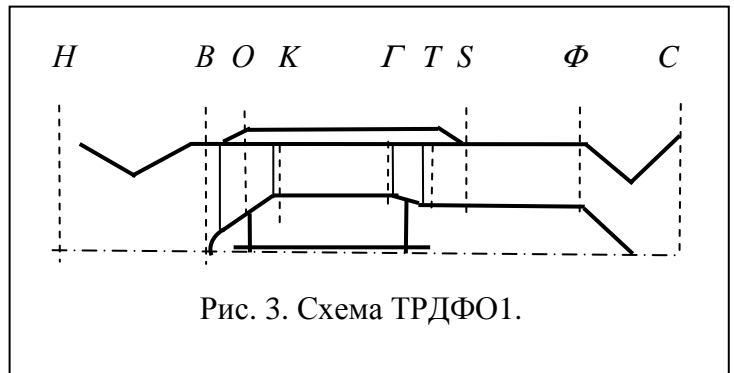


Рис. 3. Схема ТРДФО1.

Отмечаются качественные влияния вариаций площади входа во 2-ю секцию компрессора.

- Качества, сила воздействия регуляторов на расход потока через турбину ТРДФО1 те же, что и в ТРДФ3.
- В окрестности проектной точки возможно выдерживание максимальной температуры газа перед турбиной уменьшением площади входа во 2-ю секцию.
- Существенное влияние температуры газа перед турбиной на процесс в целом позволяют ожидать повышения эффективности регулирования во всем диапазоне по температуре торможения набегающего потока.

Корректируются модель функционирования, программа регулирования.

Форма уравнения тяги та же, что и у ТРДФ0, уравнения неразрывности потоков, расхода тепловой энергии, сохранения энергии при смешении, баланса работ лопаточных машин имеют вид

$$\begin{aligned}
 B_B &= B_S = B_C = B_K + B_O, \\
 E &= E_G + E_\Phi = c_p [B_K(T_G - T_K) + B_S(T_\Phi - T_S)], \\
 B_O T_O + B_K T_T &= B_S T_S, \\
 B_B(T_O - T_B) + B_K(T_K - T_O) &= B_K(T_G - T_T).
 \end{aligned}$$

Задаются условия смешения: равенство давлений газов на выходе из обводного контура, на выходе из турбины, на выходе из камеры смешения,

$$p_O = p_T = p_S \Rightarrow T_O/T_H = (T_K/T_H)/(T_T/T_T).$$

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

$$\oint \delta E/T)_k = 0 \Rightarrow T_K/T_H = (T_I/T_T)(T_\Phi/T_C),$$

где  $k$  - индекс корневого цикла.

Полагается:

$F_o$  площадь входа во 2-ю секцию компрессора – регулирующий фактор, аналогичный  $F_\phi$  в регулировании ТРДФЗ;

границу разделения компрессора на секции представляет обобщенный регулирующий фактор  $T_o$  - температура торможения в точке дробления потока;

варьированием обобщенного фактора на траектории выдерживается равенство давлений в камере смешения.

При изменяющихся значениях  $F_o$  на траектории в выражении безразмерной тяги

$$r = (\theta_\phi - \theta_c)^{1/2} - v_H = [\theta_\phi^\omega (1 - \theta_T/(\theta_K \theta_T))]^{1/2} - v_H$$

величины определяются соотношениями

$$f_o = (\theta_T^\omega / \theta_T)^{1/2},$$

$$\theta_K = \theta_K^\omega,$$

$\theta_T$  - условием контроля максимально допустимой величины, выражение  $\theta_T$  выводится исключением  $\theta_o$  из равенства давлений в смещении и баланса работ лопаточных машин,

$$\theta_o = \theta_K \theta_T / \theta_T,$$

$$f_o(\theta_T - \theta_T) = \theta_o - \theta_B + f_o(\theta_K - \theta_o),$$

где  $f_o = F_o/F_o^\omega$ ,  $o$  – индекс потока в движении на входе во 2-ю секцию компрессора.

Исследуется величина  $\theta_T$  в представлении ее функцией от  $f_o$ :

$$\theta_T = (\theta_T^\omega / f_o^2 - \theta_K + \theta_B(1 + m)) / (1 + m \theta_K / (\theta_T^\omega / f_o^2)),$$

$$m = 1 - f_o,$$

где  $m$  – степень двухконтурности.  $\theta_T$  - строго убывающая функция от  $f_o$ , что означает: в идеальной термореактивной системе «ТРДФО1» с уменьшением  $f_o$  давление перед соплом, тяга, импульс по тепловой энергии топлива увеличиваются.

Пусть  $f_o \in (0, 1]$ , следовательно, величина  $\theta_T^\omega$  достижима при  $\theta_B = 1$ . Тогда форма программы будет иметь вид

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

$$\Downarrow \Downarrow$$

$$(q_B, \theta_\phi) = \text{const} = (q_B^\omega, \theta_\phi^\omega)$$

$$(f_o, \theta_o) = \text{var}$$

$$\Downarrow \Downarrow$$

$$(\theta_T, \theta_K \theta_T / (\theta_o \theta_T)) = \text{const} = (\theta_T^\omega, 1).$$

Выводы: при отмеченных ограничениях

$$r_{\text{ТРДФО}} < r_{\text{ТРДФО1}}, \quad j_{\text{ТРДФО}} < j_{\text{ТРДФО1}}.$$

#### 4.2. Второй вариант регулирования двигателя с обводным каналом

Формируется ТРДФО2, в котором обе секции компрессора могут регулироваться варьированием их площадей входа при неизменности подобной температуры на выходе из секции.

Отмечаются специфика модификации ТРДФО2, качество влияний вариаций площади входа во 1-ю секцию компрессора в точке формирования остова.

- Остов формируется так же, как и в предыдущих модификациях: критерий оптимальности – удельная тяга; подвижные элементы остова находятся в положении, обеспечивающем оптимальное течение одноконтурной схемы.
- В точке формирования остова  $\omega$  возможен нерасчетный максимальный режим ТРДФО2, в котором он – двухконтурный ВРД. В этот режим ТРДФО2 выводится сле-

дующим образом: в 1-й секции увеличивается площадь входа -  $F_6 > F_6^{\omega}$ ; площадь входа во 2-ю секцию, состояние потока в основной камере сгорания остаются неизменными.

- При  $F_6 > F_6^{\omega}$  суммарная энергия сжатия потока в секциях увеличится, температура, давление на выходе из турбины уменьшатся, уровень эффективности использования топлива форсирования снизится, импульс по тепловой энергии топлива может уменьшиться.
- При большой проектной энергии набегающего потока следует ожидать значительного увеличения абсолютной тяги. Оптимальная величина  $F_6$  будет определяться либо ограничениями, налагаемыми собственно остовом 1-й секции (фрагментом оптимального остова ВРД по удельной тяге), либо решением задачи достижения максимума *абсолютной тяги при условии неизменности состояния потока перед турбиной*.

Таким образом, специфика регулирования ТРДФО2 в точке  $\omega$ , анализ возможностей ТРДФО1 в идеале показывают, что на траектории режимы максимальной тяги ТРДФО2 будет обеспечивать САР, исполняющая воздействия в следующей последовательности:

- 1) кардинальным законом определяются величины опорного режима;
- 2) варьируется площадь входа во 2-ю секцию компрессора по условию достижения максимально допустимой температуры газа перед турбиной;
- 3) варьируется площадь входа в 1-ю секцию компрессора по условию достижения максимума *абсолютной тяги* при условии неизменности состояния потока перед турбиной.

Функционирование ТРДФО2 моделируется следующим образом.

- ⑤ Принимается:

$$f_6 \in [1, f_6^M], f_6^M > 1,$$

где  $f_6^M$  - ограничение, налагаемое остовом 1-й секции компрессора.

- ⑤ Вводится величина  $f_{o(\theta)}$  - та безразмерная площадь, которая должна бы быть в сечении  $o$ , одноконтурной схемы,

$$f_{o(\theta)} \in [1, f_{o(\theta)}^M], f_{o(\theta)}^M > 1,$$

так что  $[1, f_6^M]$  есть прообраз  $[1, f_{o(\theta)}^M]$ .

- ⑤ В выражении безразмерной абсолютной тяги

$$r = f_{o(\theta)} \{ [\theta_{\phi} (1 - \theta_T / (\theta_K \theta_T))]^{1/2} - v_H \}$$

величины определяются соотношениями

$$\begin{aligned} \theta_K &= \theta_K^{\omega}, & \theta_T &= \theta_T^{\omega}, \\ f_o \in (0, 1] &\rightarrow f_o = (\theta_T^{\omega} / \theta_T^{\omega})^{1/2}, \\ \theta_T &= (\theta_T - \theta_K + \theta_B(1 + m)) / (1 + m \theta_K / \theta_T), \\ m &= f_{o(\theta)} - f_o. \end{aligned}$$

- ⑤ Средствами САР решается локальная условная задача максимизации  $r$  по аргументу  $f_{o(\theta)}$ .

Форма программы принимает вид

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

↓↓↓

$$(q_6, \theta_{\phi}) = \mathbf{const} = (q_6^{\omega}, \theta_{\phi}^{\omega})$$

$$(f_o, f_{o(\theta)}, \theta_O) = \mathbf{var}$$

↓↓↓↓

$$(\theta_T, r / (\max r), \theta_K \theta_T / (\theta_O \theta_T)) = \mathbf{const} = (\theta_T^{\omega}, 1, 1).$$

Вывод:

$$r_{\text{ТРДФО1}} < r_{\text{ТРДФО2}}.$$

## 5. Заключительные замечания

I. Из рассмотренных программ регулирования вариант, заключающийся в изменениях степени повышения давления компрессора при постоянной площади входа в компрессор, является лучшим в аспекте повышения уровня интегральной термореактивной эффективности.

Не исключено, что сформированных простейших предельных абстракций будет недостаточно, потребуются описание промежуточного варианта между вариантами воздействия на температуру потока на выходе из компрессора при неизменности его площади входа и на площадь входа при неизменности температуры подобия на выходе из компрессора. Имеется в виду следующее: возможности воздействия на температуру потока на выходе из компрессора при неизменности его площади входа исчерпаны; есть возможность регулирования при жесткой связи температуры потока на выходе из компрессора с площадью входа в компрессор.

II. Приводятся качественные оценки варьирований величин «площадь входа потока в компрессор, площадь входа потока в турбину»:

температура газа перед турбиной увеличивается при уменьшении площади протока газа на входе в компрессор, но уменьшается расход воздуха через двигатель;

температура газа перед турбиной увеличивается при увеличении площади протока газа на входе в турбину, расход воздуха через двигатель остается неизменным;

проблема надежного регулирования состояний потока в компрессоре решается значительно проще проблемы регулирования высокотемпературного потока в турбине.

III. Для решения практических задач проектирования может оказаться целесообразным формирование, исследование комплексных предельных абстракций, элементами которой являются простейшие предельные абстракции.

IV. На подробном подуровне первого уровня описаний теории необходимо моделировать цепочку «регулирующие факторы → ... суммарная степень повышения давления ... → регулируемые параметры», в которой регулирующие факторы – совокупность углов поворота лопаток компрессора, кардинальным регулируемым параметром является температура газа перед турбиной. В таких обстоятельствах можно формально назначить кардинальным регулирующим фактором один из углов поворота лопаток и рассмотреть конструктивно допустимые варианты регулируемых параметров, позволяющие однозначно определить положения остальных регулирующих факторов. С позиций формирования предельных абстракций оптимальным представляется следующий вариант:

в реальном времени средствами системы автоматического регулирования решается задача достижения максимума тяги по совокупности углов поворота лопаток компрессора за исключением угла, назначенного кардинальным регулирующим фактором.

V. Поскольку негатив нерасчетных режимов функционирования порождается остовом ВРД, то можно ожидать: для достижения больших сверхзвуковых скоростей полета потребуются применение иных способов повышения эффективности системы автоматического регулирования, в которых регулирование компрессора будет позитивным дополнением.

## Литература

1. *Акимов В.М., Бакулев В.И., Курзинер Р.И. и др.* Теория и расчет воздушно - реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1987.
2. *Акимов В.М., Бакулев В.И., Горбунов Г.М. и др.* Теория воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1975.
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.* Двигатели сверхзвуковой авиации: подтипы с механизмами изменения состояния потока перед компрессором. М.: ВЦ РАН, 2014.