

О формировании облика ГТД и У перспективных схем

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Рассмотрены основные направления создания перспективных схем ГТД различного назначения. Перспективные газогенераторы определили прогресс в авиации. Освещены преимущества использования регулируемых сопловых аппаратов и других регулируемых устройств. Обоснована целесообразность использования коэффициента быстроходности для формализации формирования облика турбомашин. Описаны перспективы повышения экономичности двигателей путем создания комбинированных установок.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, облик, перспективная схема, регулируемая турбина.

Введение

Под формированием облика газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (У) понимают [1, 2] обоснование выбора на начальном этапе их проектирования: типа, компоновочной и теплотехнической схемы, основных термогазодинамических параметров рабочего процесса и конструкции элементов, а также перечня критериев оценки эффективности, эксплуатационных характеристик и согласования с объектами назначения. Подобные задачи обычно сводятся к обратным задачам математической физики. Широкая область применения ГТД и У и турбомашин в целом привела к большому разнообразию как типов и конструктивных схем таких установок, так и критериев оценки их эффективности. Известно, что параметры турбомашин выражают через геометрические параметры, способы их регулирования и свойства рабочих тел, которые в комплексе могут быть объединены в критерии подобия, используемые на стадии формирования облика машин для их оптимизации [3]. Коэффициент быстроходности наиболее — эффективный из критериев оптимизации в теории размерностей, позволяющей формализовать задачу выбора перспективных схем турбомашин в зависимости от области применения.

Формулирование проблемы

ГТД и У широко используют в авиации, морском и наземном транспорте, в теплоэнергетике, в газотранспортной отрасли, что потребовало достаточно сложных схем их реализации и непрерывного развития, уровень которого характеризуется высокими показателями эффективности и параметрами рабочего процесса. Причем к настоящему времени уже для каждой из областей появляются практически оптимальные решения, в виде перспективных схем, отвечающих определенному перечню важнейших требований — показателей эффективности. В такой ситуации проблема формирования облика видоизменяется и по существу заключается в выборе из перспективных схем наиболее целесообразной для конкретного случая, что сводит задачу к смешанному типу, в котором собственно формирование облика двигателя путем многокритериальной многопараметрической оптимизации относится к обратным задачам [2], а установление оптимальности облика, как результата ее решения, подвергается прямой проверке по показателям перспективности с помощью соответствующих

признаков. Естественно, что успех ее решения зависит в значительной мере от квалификации специалистов.

Целью данного исследования является сопоставительный анализ нынешнего состояния и определение перспектив дальнейшего развития ГТД и У на этапе формирования их облика с выделением признаков прогресса и преодолением возникающих проблем при интеграции ГТД и У в технические системы.

Результаты анализа

Несомненно, что темп развития авиационного двигателестроения, как и авиационной техники в целом, традиционно опережает другие отрасли. Наглядным подтверждением такого развития является предложенная фирмой «Дженерал-Электрик» (США) методология формирования облика ГТД, заключающаяся в использовании опережающего научно-технического задела в виде перспективных газогенераторов, как важнейшего признака научно-технического прогресса. Первоначально методология предусматривалась для создания двигателей многорежимных маневренных самолетов [1, 2], а в последующем – и для самолетов гражданской авиации. С 60-х годов XX столетия методология создания двигателей на базе перспективных газогенераторов начала внедряться практически на всех авиадвигателестроительных фирмах, что явилось прогрессивным шагом в развитии. Этот период практически совпал с разработкой передовыми фирмами на базе своих высокотемпературных газогенераторов ряда демонстрационных и серийных двигателей различного назначения, в частности турбореактивных двухконтурных двигателей с форсажной камерой (ТРДДФ) для многорежимных самолетов [2].

Размещение форсажных камер в ТРДД после смешения потоков по контурам явилось причиной «неустрашимого» помпажа в таком типе двигателей [4], что оказалось серьезной проблемой, на устранение которой потребовался значительный отрезок времени, несмотря на накопление к этому времени первоначальной обширной статистической информации по газодинамической неустойчивости ГТД и У двигателестроительными фирмами, научно-исследовательскими организациями и университетами. Экспериментальное исследование режимов вращающегося срыва двухконтурного вентилятора [5], выполненное под руководством В. Н. Ершова, создавшего нашедшую мировое признание научную школу ХАИ [6] по проблеме газодинамической неустойчивости ГТД, начиная с первых поколений их разработки, подтвердило возможность развития помпажных колебаний одновременно в двух контурах ТРДДФ [4] со смещением фаз в параллельных компрессорах наружного и внутреннего контуров. Несомненно, что значительное количество публикаций, исчисляемое сотнями по данной проблеме, как представителей названной школы, так и специалистов обученных по монографии [6] или непосредственно ее автором в вузовской аудитории, косвенно свидетельствует о вкладе в ее решение В. Н. Ершова, которому в этом году отмечается 100 лет со дня рождения.

Фирма «Дженерал-Электрик» одной из первых создала на базе перспективных газогенераторов турбореактивные двигатели изменяемого рабочего процесса (ТРДИ) GE-21 и GE-23 [7] с регулируемым сопловым аппаратом (РСА) между турбинами высокого и низкого давлений. При этом, если основным критерием эффективности – признаком совершенства газогенератора

является свободная работа $L_{св}$, определяемая параметрами его рабочего процесса π_k^* и $T_{г}^*$, то наличие РСА, как характерного признака перспективной схемы ГТД, позволило здесь перераспределять работу расширения газа между этими турбинами и дополнительно совершенствовать газогенератор путем улучшения обтекания лопаточных венцов турбин и компрессоров и этим самым ослаблять рассогласование в обтекании их лопаток. В этом случае линии рабочих режимов турбокомпрессоров на их характеристиках располагаются практически эквидистантно от границ устойчивой работы, благодаря чему повышается запас устойчивой работы двигателя в целом.

Фирма «Дженерал-Электрик» также первая разработала турбовальные ГТД MS3002K и MS5002 с РСА силовой турбины (СТ) для газоперекачивающих агрегатов (ГПА) ГТК-10И и ГТК-25И [8], длительная эксплуатация которых в газотранспортной отрасли Украины подтвердила высокую надежность и экономичность благодаря применению «перекрестной программы регулирования», при которой режим работы газогенератора поддерживается практически неизменным ($n_{тк} = const$). В отличие от предыдущего случая здесь РСА позволяет перераспределять работу расширения газа не внутри газогенератора, а между газогенератором и силовой турбиной. Термогазодинамические расчетные исследования по формированию облика ГТД с РСА СТ ГПА показывают, что для повышения эффективности РСА целесообразно использовать одноступенчатые силовые турбины. Такая перспектива открывается при модернизации находящихся в эксплуатации ГПА НК-12СТ и НК-16СТ с одноступенчатыми СТ. Кроме того, сравнительно просто подобные ГПА с РСА СТ могут быть изготовлены на предприятиях Украины путем конверсии авиационных двигателей АИ-20, АИ-24, ТВЗ-117 и др., что позволило бы отказаться от дорогостоящего импорта маломощных ГПА фирмы «Солар».

Благодаря применению «перекрестной программы регулирования» перераспределением работы расширения газа между турбиной компрессора и силовой турбиной РСА СТ в ГТД с одновальным газогенератором обеспечивается оптимальная работа ГПА. Внешняя характеристика ГТД с РСА СТ описывается этим уравнением [8]

$$\bar{N}_e = 2\bar{n}_{тс} - \frac{\bar{n}_{тс}^2}{1 - \bar{C}_{a_p}(ctg\alpha_{1p} - ctg\alpha_1)}$$

где $\bar{N}_e = N_e/N_{ep}$ – относительная мощность; $\bar{n}_{тс} = n_{тс}/n_{тср}$ – относительная частота вращения силовой турбины (выводного вала двигателя); \bar{C}_{a_p} – коэффициент расхода через СТ на расчетном режиме; α_1 – угол выхода потока из РСА на среднем радиусе колеса СТ.

Высокая эффективность применения РСА СТ подтверждается, кроме того, существующими публикациями [9] по транспортным – автомобильным ГТД (АГТД), в том числе для торможения транспортного средства двигателем с помощью РСА СТ и улучшения его динамических характеристик.

Применение РСА известно также в центростремительных турбинах турбодетандерных установок и турбонаддувных агрегатов поршневых двигателей (ПД) (дизелей). Таким образом, применение РСА во всех рассмотренных случаях имеет свою перспективу в зависимости от различного функционального

назначения, что составляет отличия в признаках при формализации коэффициента быстроходности [3].

Использование турбонаддувных агрегатов в ПД значительно повышает мощность двигателя, превращая его в комбинированный турбопоршневой двигатель (ТПД) [10], сочетающий в себе преимущества поршневого двигателя по топливной экономичности и газотурбинного двигателя по удельной массе, коэффициенте приспособляемости и внешней характеристике, что выводит ТПД в ряд конкурентоспособных по сравнению с малоразмерными ГТД для региональных самолетов и легких вертолетов. Суммарная удельная масса топлива и двигателя γ_{Σ} , как один из критериев эффективности по формированию облика двигателя оказалась в этом случае практически малоотличающейся [10].

Одной из разновидностей подобного двигателя является комбинированный двигатель «Гипербар» [11], в котором параллельно с ПД размещена камера сгорания ГТД. Внесенные усовершенствования предусматривают применение центробежного компрессора (ЦБК) турбонаддува с трехъярусным рабочим колесом (РК) и двойной степенью повышения давления-сжатия, из которого воздух с меньшей степенью сжатия используется в качестве продувочного для цилиндров ПД, благодаря чему снижаются затраты энергии на продувку. Слияние потоков газов из коллектора ПД и камеры сгорания ГТД предусматривает использование двухступенчатой турбины, в которой одна ступень является импульсной, а другая – давления, что дополнительно повышает экономичность двигателя. А соединение валов ЦБК и турбины с коленчатым валом ПД по дифференциальной схеме КТТ [12] позволило улучшить динамические характеристики двигателя путем повышения коэффициента приспособляемости.

Иным способом повышения коэффициента приспособляемости, как известно, могло бы быть применение биротативной турбины [13]. Обратное расположение рабочих колес в такой турбине обеспечивает удачную петлевую компоновочную схему ГТД для расположения теплообменника-регенератора тепла выхлопных газов. Очевидно, что подобное расположение узлов двигателя может быть полезным в задаче минимизации массы теплообменника путем применения системы «STIG». Такая система особенно эффективна при наличии низкокипящего рабочего тела типа n-пептан, например в ГТД ГПА, где этот газ может быть в достаточном количестве в виде технологического [14].

Оптимальная степень повышения давления в ГТД с регенерацией тепла существенно меньше (в 2 – 5 раз), чем при ее отсутствии. В подобном случае может быть использован одноступенчатый ЦБК или один из каскадов турбокомпрессора (КНД или КВД). Применение трехъярусного дозвукового РК ЦБК с $\pi_{\Sigma}^* = 3,5 \dots 4,5$, оптимальной центростремительной турбины с КПД $\eta_{\Sigma} = 0,92 \dots 0,94$, петлевого пластинчатого теплообменника-регенератора со степенью регенерации 0,8...0,9 при умеренной температуре газа $T_{\Gamma}^* = 1100 \dots 1200\text{K}$ в автономной энергоустановке позволило авторам [15] повысить ее электрический КПД до значения $\eta_{\Sigma} = 0,35$ путем многопараметрической оптимизации с формализованными признаками перспективности [3, 16, 17].

Выводы

Изложенный сопоставительный анализ различных перспективных схем ГТД на этапе формирования их облика позволил выявить отличительные особенности, преимущества и недостатки, области целесообразного использования.

Обоснование признаков перспективности как критериев эффективности в многокритериальной многопараметрической оптимизации ГТД позволяет формализовать подобную задачу на основе распознавания образцов [17] каждой из схем в различных сферах применения.

Список литературы

1. Герасименко, В.П. Особенности концептуальных принципов формирования облика двигателей для многорегимных самолетов [Текст] / В.П. Герасименко. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та «ХАИ». 2016. — №71. — С. 55 — 61.
2. Герасименко, В.П. Проблемы создания ТРДДФ для многорегимных самолетов [Текст] / В.П. Герасименко, А.С. Балякно, В.С. Малышко. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та «ХАИ» — 2016. — №74. — С.171 — 174.
3. Диксон, С.Л. Механика жидкостей и газов. Термодинамика турбомашин [Текст] / С.Л. Диксон. Пер. с англ. Данилова Р.Е., Осипова М.И. — М.: Машиностроение, — 1981. — 213с.
4. Герасименко, В.П. Проблемы газодинамической неустойчивости ТРДДФ [Текст] / В.П. Герасименко, О.В. Кислов, М.А. Шевченко. // Тез. докл. XXI междунар. конгресса двигателестроителей — Х.: ХАИ. 2016. — С.52 — 53.
5. Влияние изменения степени двухконтурности на аэродинамические характеристики вентилятора [Текст] / В.П. Герасименко, В.Н. Ершов, В.А. Коваль и др. // Изв. ВУЗ «Авиационная техника» — 1978. — №1. — С.108 — 111.
6. Yershov, V.N. Unstable Condition of Turbodynamics. Rotating Stall [Text] / V.Yershov // U.S. Air Force Foreign Technology Division Translation FTD-MT-24-04-71, 1971, 180p.
7. Герасименко, В.П. Применение регулируемых турбин в ТРДИ [Текст] / В.П. Герасименко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та «ХАИ». — 2016. — №74. — С.175 — 179.
8. Герасименко, В.П. Газотурбинные двигатели газоперекачивающих агрегатов. Определение характеристик [Текст]: учебное пособие / В.П. Герасименко. — Х.: ХАИ. 2012. — 116с.
9. Итоги науки и техники [Текст] / Сер.: Турбиностроение. Том 3. — М.: ВИНТИ. — 1984. — 132с.
10. Герасименко, В.П. О концептуальных принципах формирования облика авиационных двигателей [Текст] / В.П. Герасименко, О.В. Кислов // Авиационно-космическая техника и технология. — Х.: ХАИ. — 2015. — №2(119). — С.16—19.
11. Мере, Р.Ле. Высокофорсированные дизели с удельной массой 1,8 кг/л.с. [Текст] / Р.Ле.Мере, Ш.Ф. Тор // Форсированные дизели: Доклады на XI Международном конгрессе по двигателям (СИМАК) — М.: Машиностроение. — 1978. — С.316 — 331.
12. Кроногард. Автомобильные трехвальные двигатели типа КТТ, объединяющие турбину и трансмиссию. Характеристики и отличительные особенности [Текст] / Кроногард. Тр.америк.общ.инж.-мех.Сер.: Энергетические машины и установки. — 1978. — Т.100. — №1. — С.107 — 127.

13. Яишников, В.И. Малоразмерный газотурбинный двигатель с биротативной турбиной [Текст] / В.И. Яишников // *Авиационно-космическая техника и технология*. — Х.: ХАИ. — 2006. — №10(36). — С.173 — 174.

14. Билека, Б.Д. Выбор схемы теплоутилизующей энергоустановки и основных параметров термодинамического цикла на низкотемпературных рабочих телах [Текст] / Б.Д. Билека, Е.П. Васильев, В.Я. Кабков // *Наукові праці: науково-методичний журнал «Києво-Могилянська академія»* — 2005. — Т.43.Вип.30. — С.58—62.

15. Герасименко, В.П. Оптимизация малоразмерных газотурбинных двигателей [Текст] / В.П. Герасименко, М.М. Овчинников, М.Ю. Шелковский // *Вестник НТУ «ХПИ»* — 2014. — №12(1055). — С.25 — 26.

16. Герасименко, В.П. Математические методы планирования испытаний воздушно-реактивных двигателей [Текст]: учебное пособие /В.П. Герасименко. — Х.: ХАИ. — 1982. — 165с.

17. Фомин, Я.А. Статистическая теория распознавания образов [Текст] / Я.А. Фомин, Г.Р. Тарловский // — М.: Радио и связь — 1986. — 264с.

Поступила в редакцию 24.02.2017

Щодо формування обрису ГТД і У перспективних схем

Розглянуто основні напрями створення перспективних схем ГТД різного призначення. Перспективні газогенератори визначили прогрес у авіації. Висвітлено переваги використання регульованих соплових апаратів турбін та інших регульованих пристроїв. Обґрунтовано доцільність використання коефіцієнта швидкохідності для формалізації формування обрису турбомашин. Описано перспективи підвищення екологічності двигунів шляхом створення комбінованих установок.

Ключові слова: газотурбінний двигун, обрис, перспективна схема, регульована турбіна.

About Appearance Perspective Gas Turbines and Units

Fundamental directions creating of different perspective gas turbines have been considered. The perspective hot gas generator are determinating progress in aviation. Advantages using variable pitch turbine nossle and other regulating units are shown. The expediency of using quickly efficiently for formalization appearance turbomachinery is based. Perspectives of rise fuel efficiency engines by creating combine units are described.

Keywords: gasturbine engine, appearance, perspective scheme, regulating turbine.

Сведения об авторах:

Герасименко Владимир Петрович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Теории авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».

Грищенко Алексей Вадимович – магистрант кафедры Теории авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».