

Концепции авиационных двигателей для перспективных пассажирских самолетов

Гордин М.В., Палкин В.А.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: vapalkin@ciam.ru

Определены основные критические технологии, разработка которых необходима для реализации концепций авиационных двигателей, удовлетворяющих целевым индикаторам для перспективных самолетов и их силовых установок. Приведены результаты ряда проектов ЦИАМ по разработке критических технологий для перспективных авиационных двигателей.

Ключевые слова: авиационный двигатель, гибридный двигатель, «электрический» двигатель, силовая установка, пассажирский самолет, критические технологии.

Concepts of aero engines for advanced civil aircraft

Gordin M.V., Palkin V.A.

CIAM, Moscow

The main critical technologies that need to develop for realization of the possible concepts of aero engines in order to meet the target indicators for advanced civil aircraft and their propulsion systems have been identified. The critical technologies developed at CIAM for advanced aero engines are shown.

Keywords: aero engine, hybrid engine, “electric” engine, propulsion system, civil aircraft, critical technologies.

Введение

Авиационный двигатель является ключевым звеном любого летательного аппарата, определяя его летно-технические характеристики, безопасность, надежность, экономичность и стоимость эксплуатации. Современный авиадвигатель – уникальное и одно из самых сложных изделий машиностроения, на создание которого требуется в 1,5...2 раза больше времени, чем на разработку планера и авиационного оборудования.

Одним из ключевых положений методологии создания и модернизации авиационных двигателей является опережающая отработка критических технологий [1, 2].

За более чем 70-летний период развития гражданской реактивной авиации переход к новой схеме двигателя, повышение параметров рабочего процесса, внедрение новых конструкционных материалов и технических решений, а также улучшение аэродинамических характеристик самолетов позволили уменьшить затраты топлива на пассажиро-километр более чем на 80%, из которых почти 50% снижения достигнуто благодаря совершенствованию двигателя [3].

Улучшение показателей авиационных двигателей гражданского назначения происходит при постоянном ужесточении требований к уровню шума и эмиссии вредных веществ (рис. 1). В связи с этим в разрабатываемых в настоящее время двигателях необходимо применять такие технические решения и технологии, которые позволят удовлетворить требованиям ИКАО, планируемым к принятию в 2020...2030 гг. Учитывая рекомендации ИКАО и результаты исследований, для перспективных образцов авиационной техники разработаны целевые индикаторы, определяющие улучшение характеристик по временному фактору (рис. 2).

В соответствии с этими индикаторами новые пассажирские самолеты с перспективными двигателями в 2030-е годы должны обеспечить:

- снижение шума не менее чем на 30 ЕPNдБ относительно требований Главы 4 ИКАО;
- снижение крейсерского удельного расхода топлива не менее чем на 20% относительно уровня двигателя ПД-14;
- снижение эмиссии NO_x по циклу «взлет – посадка» не менее чем на 65% относительно требований SAEP/6 ИКАО.

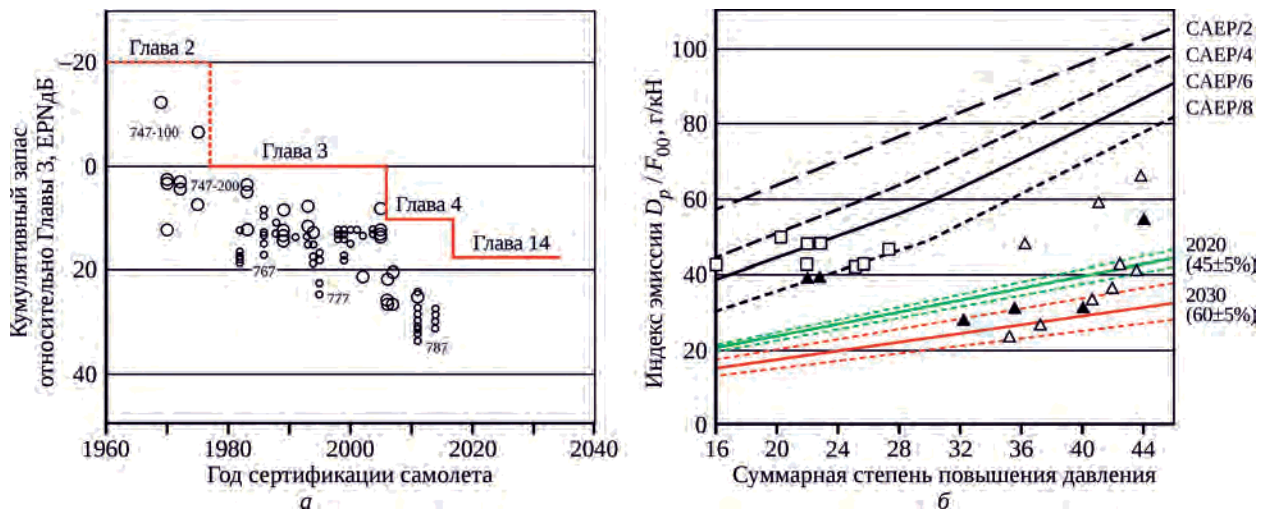


Рис. 1. Требования ИКАО по уровню шума (а) и эмиссии NO_x (б) [4, 5]:

□ – двигатели в эксплуатации тягой менее 89 кН; Δ – двигатели в эксплуатации тягой более 89 кН;
 \blacktriangle – двигатели ближнесрочной перспективы тягой более 89 кН

	2020 г.	2025 г.	2030 г.
Снижение шума, EPNдБ (отн. Главы 4)	20	25	30
Снижение крейсерского удельного расхода топлива, % (отн. уровня двигателя ПД-14)	5	10	20
Снижение эмиссии NO_x , % (отн. CAEP/6)	50	60	65

Рис. 2. Основные целевые индикаторы для перспективных пассажирских самолетов [6]



Рис. 3. Аэродинамические схемы перспективных пассажирских самолетов и двигатели для их силовых установок [7]

Достижение заданных индикаторов требует решения ряда сложных задач, разработки перспективных технологий и может быть реализовано только при комплексном подходе путем улучшения характеристик двигателя и летательного аппарата (ЛА), а также совершенствования системы управления воздушным движением.

Ключевые критические технологии для авиационных двигателей перспективных пассажирских самолетов

Несмотря на достигнутый высокий уровень технического совершенства авиационных двигателей, необходимы новые решения для дальнейшего улучшения их показателей как на уровне архитектуры, так и на уровне повышения эффективности отдельных узлов.

Возможные аэродинамические схемы перспективных пассажирских самолетов и двигателей для их силовых установок показаны на рис. 3.

По сравнению с двигателями пятого поколения (PW1000G, LEAP, GE9x, Trent) максимальное уменьшение удельного расхода топлива при повышении полетного и термического КПД (одновременном повышении параметров цикла и степени двухконтурности) может составить 25...30% для турбовинтовентиляторного двигателя (ТВВД) или для распределенной силовой установки (РСУ). Уменьшение удельного расхода топлива для ТРДД с прямым или редукторным приводом вентилятора или ТРДД со сложным термодинамическим циклом (например, с промежуточным охлаждением) при повышении параметров цикла и степени двухконтурности до $m_0 = 14...18$ может составить 15...20% [2, 6, 7].

Однако повышение полетного и термического КПД и улучшение аэродинамических характеристик ЛА приводит к существенному (в 1,5...2,5 раза) уменьшению размерности газогенератора, что усложняет проектирование его высокоэффективных узлов, а при значениях взлетной тяги менее 150...180 кН может потребовать изменения его конструктивной схемы [8].

ТРДД традиционной схемы с прямым ($m_0 < 14$) или с редукторным ($m_0 > 14$) приводом вентилятора сохраняют свою привлекательность при повышении параметров рабочего процесса. Критическими технологиями для таких двигателей являются [2, 6, 7]:

- высокоэффективный малошумный вентилятор с лопатками рабочего колеса и корпусом из композиционного материала;

- малоступенчатый компрессор низкого давления с регулируемыми лопатками входного направляющего аппарата (высоконагруженный и высокооборотный для ТРДД с редукторным приводом вентилятора);

- высоконагруженный ($\pi_k^* \geq 22$) высокоэффективный компрессор высокого давления с развитой механизацией проточной части, управлением течением и системой активного регулирования радиальных зазоров;

- малоэмиссионная камера сгорания большого ресурса с жаровой трубой из керамического композиционного материала;

- высокотемпературная турбина высокого давления с лопатками соплового аппарата и рабочего колеса из монокристаллического или керамического композиционного материала, с системой активного регулирования радиальных зазоров и эффективным теплообменником в системе охлаждения охлаждающего воздуха;

- турбина низкого давления с неохлаждаемыми лопатками соплового аппарата и рабочего колеса из керамического композиционного материала и системой активного регулирования радиальных зазоров;

- планетарный редуктор мощностью 30...60 МВт с передаточным отношением $i_p = 2,5...3,5$ с подшипниками скольжения с покрытием из композиционного материала;

- электроприводные агрегаты топливной и масляной систем, гибридные или керамические подшипники качения с высоким параметром Dn , высокоэффективные уплотнения, регулируемое сопло наружного контура, тонкая мотогондола;

- система автоматического управления (САУ) на основе алгоритмов, оптимизирующих режимы работы двигателя, исходя из его текущего технического состояния;

- системы сбора диагностической информации (как в полете, так и на земле) для динамического управления ресурсом и оптимизации процедур осмотра и технического обслуживания;

- новые конструкционные материалы и покрытия.

Турбовинтовентиляторный двигатель («открытый» ротор) обладает высокой топливной экономичностью, однако главным его недостатком является повышенный, по сравнению с ТРДД, уровень шума.

С помощью современных численных методов на основе систем уравнений 3D RANS и 3D URANS достигнут значительный прогресс в снижении шума в источнике биротативного винтовентилятора при сохранении высокого уровня КПД. Испытания, проведенные в ЦАГИ в 2012...2013 гг., подтвердили результаты расчетов.

Основными критическими технологиями для ТВВД являются [2, 6, 7]:

- высокоэффективный при числах $M = 0,75...0,80$ биротативный винтовентилятор с низким уровнем шума, лопатками из полимерного композиционного материала и механизмом изменения шага;

- высокотемпературный дифференциально-планетарный редуктор с эффективной системой охлаждения;
- новые типы высокоэффективных уплотнений;
- вращающееся сопло и центральное тело;
- новые конструкционные материалы и покрытия.

Распределенная силовая установка при приемлемых габаритных размерах позволяет обеспечить высокое значение степени двухконтурности. Однако для реализации ее преимуществ перед традиционной силовой установкой необходимы [2, 6, 7]:

- высокоэффективный малозумный выносной вентилятор, работающий при повышенном уровне неравномерности потока на входе;
- система активного управления течением в агрессивных каналах для уменьшения потерь давления, пульсаций и неоднородности потока;
- надежная система передачи энергии от источника мощности (газогенератора) к потребителям (выносным вентиляторам).

Несмотря на прекращение эксплуатации самолетов Ту-144 и Concorde, исследования сверхзвуковых пассажирских самолетов продолжают. В настоящее время разрабатываются критические технологии и проводится их экспериментальная проверка для сверхзвуковых деловых и пассажирских самолетов следующего поколения с учетом удовлетворения требованиям по шуму от звукового удара и эмиссии.

Критическими технологиями для **двигателей сверхзвуковых самолетов** являются [7]:

- адаптивный вентилятор;
- перспективный газогенератор;

- регулируемые лопатки сопловых аппаратов турбин высокого и низкого давления;
- регулируемый смеситель;
- сопло с низким уровнем шума.

Переход от газотурбинного двигателя к полностью **электрическому двигателю** позволит уменьшить затраты мощности на создание тяги на ~ 40% и с учетом разрабатываемых технологий удовлетворить целям ACARE 2050 г. (рис. 4). Возможные схемы перспективных дозвуковых самолетов с гибридной или электрической силовой установкой показаны на рис. 5.

В турбоэлектрических или частично турбоэлектрических силовых установках химическая энергия топлива преобразуется (полностью или частично) в электрическую энергию для питания электромоторов привода движителей. В гибридно-электрических силовых установках часть электроэнергии вырабатывается за счет химической энергии топлива, а часть – за счет использования аккумуляторных батарей или эквивалентных систем хранения.

Один из вариантов гибридной силовой установки, в котором для привода вентилятора используется как механическая энергия от турбины, так и электрическая энергия от электромотора, называется параллельным. Он не обеспечивает улучшение аэродинамических характеристик ЛА, но уменьшает затраты топлива и является привлекательным как первый шаг к электрификации силовой установки путем установки генератора на валу газотурбинного двигателя. При этом замена генератора на электромотор-генератор в дальнейшем может быть простой опцией.

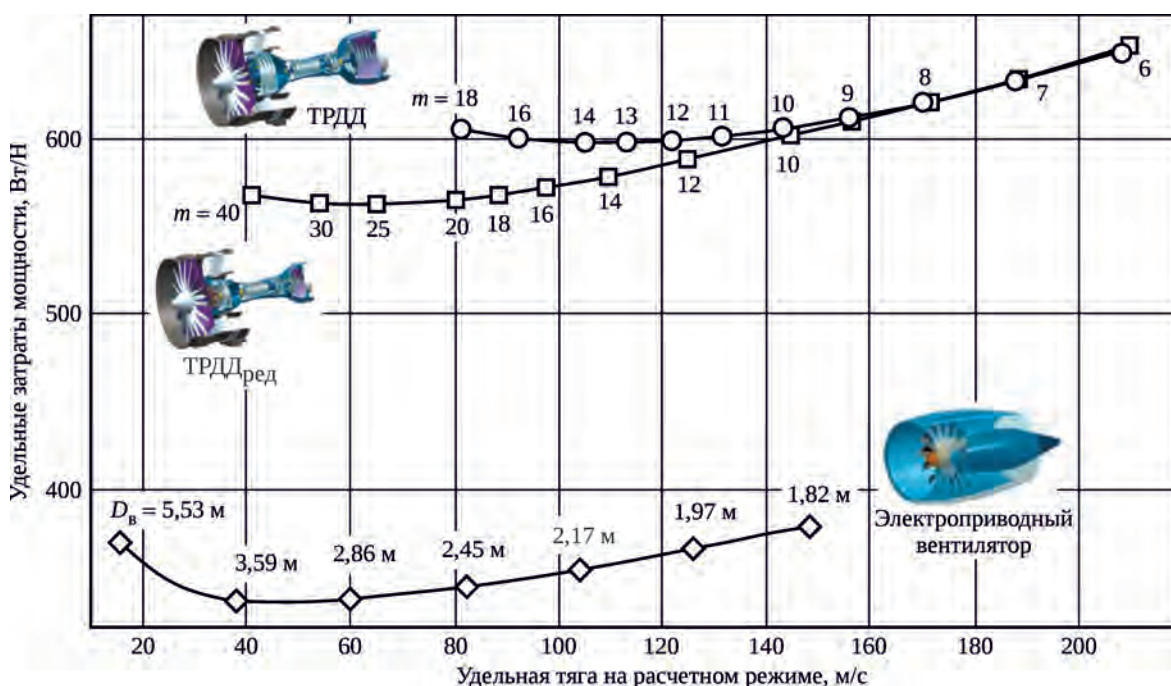


Рис. 4. Изменение удельной мощности от удельной тяги для различных схем двигателей [9]

Переход к полностью электрическому двигателю – долгий путь, требующий разработки новых технологий. Принимая это во внимание, NASA предлагает поэтапный подход к созданию электрического двигателя для ЛА различного назначения (рис. 6) [11].

Планируется, что для региональных самолетов вместимостью до 50 человек необходимое оборудование (электромоторы приемлемой массы мощностью 1...2 МВт) будет доступно в течение ближайших 10 лет, для 100-местных самолетов (электромоторы мощностью 2...5 МВт) – в течение 20 лет, а для самолетов класса B737/A320 (электромоторы мощностью 5...10 МВт) – в течение 30 лет [10].

Кроме электромоторов и генераторов требуется разработка накопителей и преобразователей электрической энергии, а также бортовых электросетей под высокие мощности. При этом весовая эффективность всех элементов электрооборудования (за исключением сверхпроводящих) значительно снижается с ростом их мощности. Кроме того, хранение энергии в виде топлива пока на порядки более эффективно, чем любые существующие системы хранения электрической энергии. Поэтому полностью электрические легкие и сверхлегкие ЛА хоть и существуют, но имеют крайне ограниченную продолжительность полета. Гибридная схема, предполагающая генерацию электроэнергии



Рис. 5. Аэродинамические схемы перспективных пассажирских самолетов с гибридными и электрическими СУ [10, 11]



Рис. 6. Спиральный подход для создания гибридно-электрической силовой установки (СУ) [11]

на борту посредством теплового двигателя (поршневого или газотурбинного), позволяет обойти данное ограничение и является на текущем этапе развития наиболее перспективной для ЛА различных типов, в том числе для легких самолетов с числом пассажиров не более 12, а в недалеком будущем и для региональной авиации.

Критические технологии, разработанные в ЦИАМ для перспективных авиационных двигателей

Рассмотренные концепции авиационных двигателей для перспективных пассажирских самолетов предусматривают применение новых технологий, и ЦИАМ активно работает в этом направлении.

Особенностью работ ЦИАМ является их комплексность, при которой теоретические исследования дополняются созданием и испытанием демонстраторов технологий, в том числе в содружестве с предприятиями АО «ОДК».

Одно из направлений связано с развитием численных методов. В последние годы в институте разработаны высокоэффективные методы расчета для проектирования узлов двигателя, в том числе с использованием суперкомпьютеров. Они учитывают нестационарные эффекты взаимодействия, переменность турбулентности по тракту двигателя, химическую кинетику и др. Эффективность этих методов подтверждена результатами модельных и натурных испытаний деталей и узлов двигателей на стендах ЦИАМ. Последние работы в этом направлении связаны с использованием метода виртуальной реальности для проектирования компонентов силовой установки (рис. 7).

ЦИАМ обладает богатым опытом разработки и применения высокоэффективных надроторных устройств целевого типа для обеспечения устойчивой работы и уменьшения шума вентиляторов и компрессоров.

В настоящее время в институте разрабатывается новая методология проектирования надроторных устройств, основанная на методах расчета 3D вязкого нестационарного течения [15].

Для ТРДД с редукторным приводом вентилятора рассматривается возможность применения высокооборотного компрессора низкого давления с большой степенью повышения давления. В ЦИАМ проведено проектирование такого компрессора и определены его характеристики.

Для реализации высокой степени повышения давления в двухвальном ТРДД необходим КВД со степенью повышения давления $\pi_k^* = 25 \dots 27$. В ЦИАМ на основе результатов экспериментальных исследований типовых ступеней, спроектированных с помощью современных методов, учитывающих нестационарное взаимодействие лопаточных венцов, разработан аэродинамический проект 10-ступенчатого компрессора с $\pi_k^* = 27$ [16].

Применение редуктора позволяет выбрать оптимальные значения частот вращения вентилятора и его турбины, а также уменьшить шум вентилятора и количество ступеней турбины низкого давления. Совместно с ПАО «Кузнецов» был спроектирован, изготовлен и испытан редуктор мощностью 33 000 л.с. Кроме того, в ЦИАМ разработан проект редуктора мощностью 55 000 л.с. [6]. Характерными особенностями спроектированных редукторов являются: зубчатые колеса (сателлиты) из теплостойкой стали с коэффициентом перекрытия более 2 и подшипники скольжения в опорах сателлитов с антифрикционным покрытием из композиционного материала.

Применение композиционных материалов является одной из основных тенденций развития авиационных двигателей. ЦИАМ достиг значительных результатов в разработке технологий для проектирования и изготовления компонентов малоразмерного двигателя из различных композиционных материалов (рис. 8). В частности, в ЦИАМ были спроектированы,

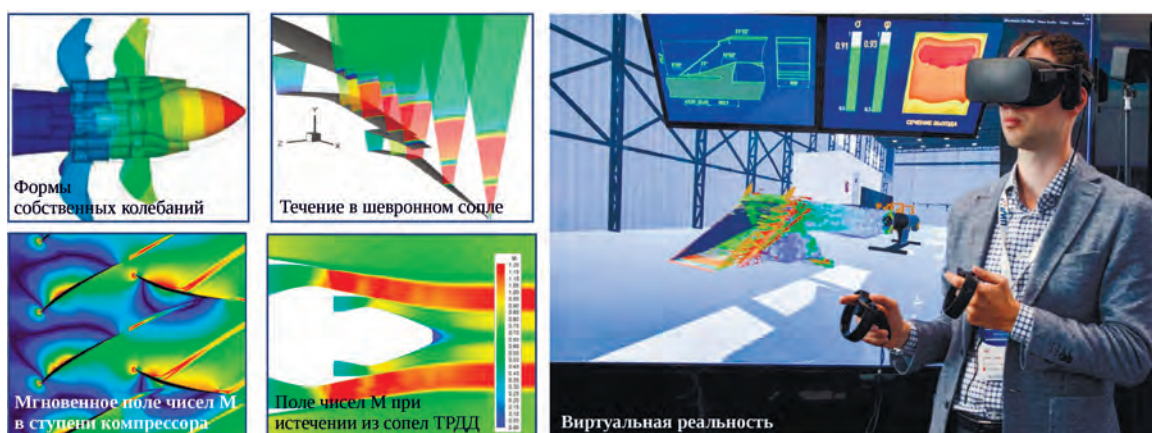


Рис. 7. Примеры применения численных методов для расчетов течений в узлах двигателя и метода виртуальной реальности для проектирования компонентов силовой установки [6, 12 – 14]

изготовлены и испытаны жаровая труба и неохлаждаемая полая лопатка соплового аппарата турбины компрессора из керамического композиционного материала. Успешные испытания этих компонентов проведены при рабочей температуре газа более 1200°C. Полученный опыт может быть использован при разработке аналогичных компонентов для двигателей большой тяги.

Важным направлением является применение аддитивных технологий для изготовления компонентов авиационных двигателей [19]. В ЦИАМ были спроектированы под аддитивное производство (рис. 9):

- лопатка рабочего колеса ТВД дефлекторного типа, обеспечивающая значительное уменьшение расхода охлаждающего воздуха и массы ротора;
- неохлаждаемая полая лопатка ТНД с переменной толщиной стенки для резонансной отстройки;
- секция высокоэффективного ветвистого теплообменника.

Эти компоненты из различных материалов были изготовлены партнерами ЦИАМ с помощью аддитивного производства (методом селективного лазерного спекания).

Совместно с предприятиями АО «ОДК» разработана технология изготовления биметаллического блиска турбины, в котором охлаждаемые лопатки выполнены из монокристаллического сплава, а диск – из порошкового сплава (рис. 10). При этом диск может быть изготовлен как из однородного, так и разнородного порошка. Такая конструкция позволяет уменьшить массу ротора турбины на 30...40%.

Важным направлением развития авиационных двигателей является применение электрических технологий. Оно связано как с использованием электроприводных агрегатов в системах самолета и двигателя, так и с разработкой гибридных и электрических силовых установок.

На перспективных двигателях предполагается применение интеллектуальной распределенной САУ со SMART-датчиками, в том числе и беспроводными.



Рис. 8. Детали авиационного двигателя из композиционных материалов [17, 18]

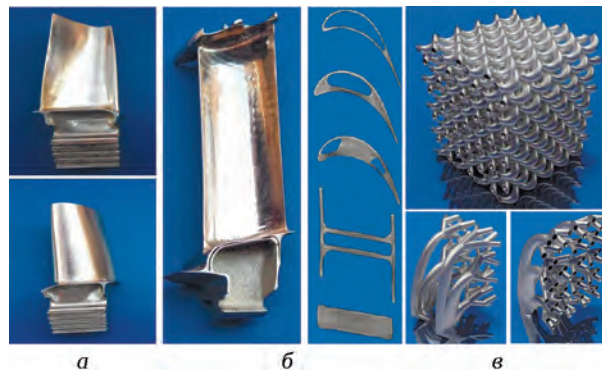


Рис. 9. Применение аддитивных технологий [19, 20]: а – лопатка рабочего колеса ТВД; б – неохлаждаемая полая лопатка ТНД; в – секция ветвистого теплообменника

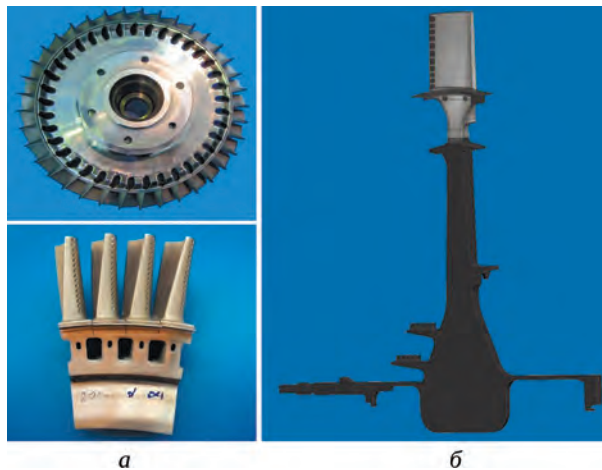


Рис. 10. Биметаллический блиск турбины (а) и диск из разнородного порошка (б) [21, 22]

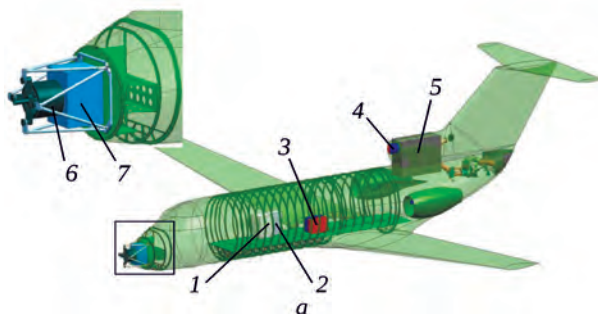
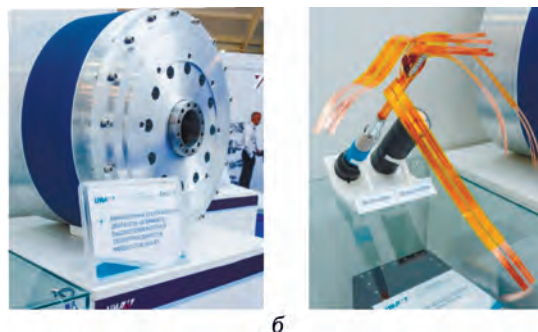


Рис. 11. Демонстратор технологий с гибридной силовой установкой [25]: а – общая схема; б – электромотор и электрооборудование на основе высокотемпературной сверхпроводимости; 1 – блок управления аккумулятором; 2 – блок управления электромотором; 3 – аккумуляторы; 4 – электрогенератор; 5 – турбовальный ГТД на основе ТВ2-117; 6 – ВТСП электромотор; 7 – криогенная система



Управление двигателем будет осуществляться по неизмеряемым параметрам с использованием математической модели «виртуального» двигателя [23].

Для отработки электрических технологий и новых принципов управления в ЦИАМ на базе серийного двигателя создан двигатель-демонстратор. Его особенностями являются электроприводные топливный и масляный насосы, механизм поворота лопаток направляющих аппаратов компрессора, встроенный стартер-генератор и интеллектуальная распределенная САУ [23, 24].

ЦИАМ совместно с СибНИА и ЗАО «СуперОкс» на базе самолета Як-40 разрабатывает демонстратор технологий с гибридной силовой установкой (рис. 11), в которой используется электромотор и электрообору-

дование на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП).

Заключение

Завершая статью, целесообразно еще раз указать на важную роль авиационных двигателей в прогрессе пассажирского транспорта будущего. Ожидается, что на ближне- и среднесрочную перспективу около половины снижения расхода топлива и эмиссии CO_2 для ЛА в целом будет получено именно за счет совершенствования двигателей. В более далекой перспективе повышение эффективности будет скорее всего связано с применением гибридных и электрических технологий.

Литература

1. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-21. Авиационные двигатели. Кн. 3 / Под ред. В.А. Скибина, Ю.М. Темиса и В.А. Сосунова. М.: Машиностроение, 2010. 720 с.
2. Babkin V., Palkin V. R&D Concepts of Future Wide Body Aircraft Engine. Aero Engine China 2016 – Next Generation Aero Engine To Take Off. October 25–26, 2016. Shanghai, P.R. China.
3. Aerospace&Defense. 2011 Year in Review and 2012 Forecast. Issue 2. February, 2012. PricewaterhouseCoopers LLP.
4. The Sustainability of UK Aviation: Trends in the Mitigation of Noise and Emissions. Independent Transport Commission. March, 2016.
5. Madden P. CAEP Combustion Technology. Review Process and CAEP NO_x Goals. 2 July 2014. Rolls-Royce. 2014.
6. Бабкин В.И. Научные основы авиационного двигателестроения. Двигатель № 2 (92), 2014. С. 12–15.
7. Palkin V. Concepts of Aero Engines for Future Civil Aircraft. Aero Engine Simulation and Test Technology in China and Russia. The 2nd Aero Engine Technology Development Forum, 5 November, 2018. Zhuhai, P.R. China.
8. Arndt N. Environmentally Friendly Aero-Engines for the 21st Century. CEAS Berlin, 12th September, 2007. Rolls-Royce Deutschland.
9. Isikveren A.T. Advanced Propulsion and Power System Integration Strategies for Transport Aircraft. Disruptive Green Propulsion Technologies: Beyond the Competitive Horizon. Institute of Mechanical Engineers, London, United Kingdom, 17–18 November 2014.
10. Jankovsky A. NASA. Hybrid Gas-Electric Subproject Overview. Interchange with Meggitt Aircraft Braking Systems, Aug 31, 2016. NASA, 2016.
11. Del Rosario R. A Future with Hybrid Electric Propulsion Systems: A NASA Perspective. Turbine Engine Technology Symposium, Strategic Visions Workshop, Dayton, OH, September 11, 2014. NASA.
12. Научный вклад в создание авиационных двигателей. В 2-х книгах. Кн. 2 / Под общей науч. ред. В.А. Скибина и В.И. Солониной. М.: Машиностроение, 2000. 609 с.
13. Александров В.Г., Осипов А.А. Численное моделирование нестационарного аэродинамического взаимодействия двух плоских решеток профилей // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2006. Том 46. № 6. С. 1114–1127.
14. Милешин В.И., Дружинин Я.М. Численное исследование клокинг-эффекта роторов и статоров в двухступенчатом высоконагруженном компрессоре // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2018. № 54. С. 90–104.
15. Жданов В.В., Милешин В.И. Исследование влияния надроторных устройств лабиринтного типа на характеристики последней ступени компрессора // Сб. тезисов докладов. Всероссийская научно-техническая конференция «АВИАДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА», 24–27 ноября 2015. Москва, ЦИАМ. С. 202–203.
16. Милешин В.И., Кожемяко П.Г., Фатеев В.А. Аэродинамические аспекты создания десятиступенчатого КВД на $\pi_k^* = 27$ // Сб. тезисов докладов. Всероссийская научно-техническая конференция «АВИАДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА», 24–27 ноября 2015. Москва, ЦИАМ. С. 228–230.
17. Каримбаев Т.Д. Создание деталей и узлов авиационных двигателей с применением композиционных материалов на основе инновационных решений // Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23. № 2 (84). С. 33–43.

18. Каримбаев Т.Д., Мезенцев М.А., Ежов А.Ю. Разработка и экспериментальные исследования неметаллических деталей и узлов горячей части перспективного газотурбинного двигателя // Вестник СГАУ. 2015 Т. 14. № 3. Ч. 1. С. 128–137.
19. Аддитивные технологии в газотурбостроении // Интервью с Л.А. Магеррамовой. 8 августа 2016. ЦИАМ.
20. Магеррамова Л.А., Васильев Б.Е. Анализ возможности применения топологической оптимизации при проектировании неохлаждаемых рабочих лопаток турбин // Вестник СГАУ. 2015. Т. 14. № 3. Ч. 1. С. 139–147.
21. Магеррамова Л.А. Применение биметаллических блисков, изготавливаемых методом ГИП из гранулируемых и литейных никелевых суперсплавов, для увеличения надежности и ресурса газовых турбин // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15. № 4 (44). С. 33–38.
22. Магеррамова Л.А., Стадников А.Н. Экспериментальное исследование образцов-имитаторов биметаллического моноколеса высокотемпературной турбины с охлаждаемыми лопатками для перспективных газотурбинных двигателей // Вестник СГАУ. 2015. Т. 14. № 3. Ч. 1. С. 114–121.
23. Гуревич О.С. Перспективные направления развития САУ ГТД в работах ГНЦ ЦИАМ // Сб. тезисов докладов. Всероссийская научно-техническая конференция «АВИАДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА», 24–27 ноября 2015. Москва, ЦИАМ. С. 859–861.
24. Белкин Ю.С., Близнюков Л.А., Жигунов М.М. Исследовательский комплекс для испытаний демонстрационной системы управления электроприводами топливного насоса и механизации компрессора // В сб. «ЦИАМ 2001–2005. Основные результаты научно-технической деятельности». В 2-х томах. Том I / Под общей научной редакцией В.А. Скибина, В.И. Солонина, М.Я. Иванова. М.: ЦИАМ, 2005. 472 с.
25. Varyukhin A. CIAM Research in Hybrid & Electric Aircraft Propulsion System Technologies. CIAM-Airbus Seminar, April 24, 2019. Moscow, Russia.

References

1. Mashinostroenie. Entsiklopediia [Engineering. Encyclopedia]. Vol. IV-21. Aviatsionnye dvigateli [Aircraft engines]. Book 3. Edited by V.A. Skibin, Iu.M. Temis, V.A. Sosunov. Moscow: Mashinostroenie, 2010. 720 p.
2. Babkin V., Palkin V. R&D Concepts of Future Wide Body Aircraft Engine. Aero Engine China 2016 – Next Generation Aero Engine To Take Off. October 25–26, 2016. Shanghai, P.R. China.
3. Aerospace&Defense. 2011 Year in Review and 2012 Forecast. Issue 2. February, 2012. PricewaterhouseCoopers LLP.
4. The Sustainability of UK Aviation: Trends in the Mitigation of Noise and Emissions. Independent Transport Commission. March, 2016.
5. Madden P. CAEP Combustion Technology. Review Process and CAEP NO_x Goals. 2 July, 2014. Rolls-Royce. 2014.
6. Babkin V.I. Nauchnye osnovy aviatsionnogo dvigatelestroeniia [Scientific Foundations of Aircraft Engine Manufacturing]. Dvigatel'. No. 2 (92). 2014. P. 12–15.
7. Palkin V. Concepts of Aero Engines for Future Civil Aircraft. Aero Engine Simulation and Test Technology in China and Russia. The 2nd Aero Engine Technology Development Forum, 5 November, 2018. Zhuhai, P.R. China.
8. Arndt N. Environmentally Friendly Aero-Engines for the 21st cent. CEAS Berlin, 12th Sept., 2007. Rolls-Royce.
9. Isikveren A. Advanced Propulsion and Power System Integration Strategies for Transport Aircraft. Disruptive Green Propulsion Technologies: Beyond the Competitive Horizon. Institute of Mech. Engineers, London, UK, 17–18 November 2014.
10. Jankovsky A. NASA. Hybrid Gas-Electric Subproject Overview. Interchange with Meggitt Aircraft Braking Systems, Aug 31, 2016. NASA, 2016.
11. Del Rosario R. A Future with Hybrid Electric Propulsion Systems: A NASA Perspective. Turbine Engine Technology Symposium, Strategic Visions Workshop, Dayton, OH, September 11, 2014. NASA.
12. Nauchnyi vklad v sozдание aviatsionnykh dvigatelei [Scientific Contribution to the Creation of Aero Engines]. In 2 books. Book 2. Edited by V.A. Skibin, V.I. Solonin. Moscow: Mashinostroenie, 2000. 609 p.
13. Aleksandrov V.G., Osipov A.A. Chislennoe modelirovanie nestatsionarnogo aerodinamicheskogo vzaimodeistviia dvukh ploskikh reshetok profilei [Numerical Study of Nonstationary Aerodynamic Interaction of Two Plane Airfoil Cascades] Zhurnal Vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics]. Vol. 46. No. 6. 2006. P. 1114–1127.
14. Mileshin V.I., Druzhinin Ia.M. Chislennoe issledovanie kloking-effekta rotorov i statorov v dvukhstupenchatom vysokonagruzhennom kompressore [Numerical Investigation of Rotors and Stators Clocking Effect in a Highly Loaded Two-Stage Compressor]. Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika [Bulletin of PNIPU. Aerospace Engineering]. 2018. No. 54. P. 90–104.

-
15. Zhdanov V.V., Milesin V.I. Issledovanie vliianiia nadrotornykh ustroystv labirintnogo tipa na kharakteristiki poslednei stupeni kompressora [Research of the Influence of Labyrinth Type Case Treatment on the Characteristics of the Last Compressor Stage]. Abstracts of papers. Vserossiiskaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia "Aviadvigateli XXI veka". Moscow: TsIAM. 2015. P. 202–203.
 16. Milesin V.I., Kozhemiako P.G., Fateev V.A. Aerodinamicheskie aspekty sozdaniia desiatistupenchatogo KVD na $\pi_c^* = 27$ [Aerodynamic Aspects of Creating a Ten-Stage HPC at PRC = 27]. Abstracts of papers. Vserossiiskaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia "Aviadvigateli XXI veka". Moscow: TsIAM. 2015. P. 228–230.
 17. Karimbaev T.D. Sozdanie detalei i uzlov aviatsionnykh dvigatelei s primeneniem kompozitsionnykh materialov na osnove innovatsionnykh reshenii [Creation of Parts and Modules of Aero Engines Using Composite Materials Based on Innovative Solutions]. Vestnik UGATU. 2019. Vol. 23. No. 2(84). P. 33–43.
 18. Karimbaev T.D., Mezentsev M.A., Ezhov A.Iu. Razrabotka i eksperimental'nye issledovaniia nemetallicheskiikh detalei i uzlov goriachei chasti perspektivnogo gazoturbinnogo dvigatel'ia [Development and Experimental Studies of Non-Metallic Parts and Modules of the Hot Part of an Advanced Gas Turbine Engine]. Vestnik SGAU. 2015. Vol. 14. No. 3. Part 1. P. 128–137.
 19. Additivnye tekhnologii v gazoturbostroenii [Additive Technologies in Gas Turbine Engineering]. Interview L.A. Magerramova. 2016. TsIAM.
 20. Magerramova L.A., Vasil'ev B.E. Analiz vozmozhnosti primeneniia topologicheskoi optimizatsii pri proektirovanii neokhlazhdaemykh rabochikh lopatok turbin [Analysis of the Possibility of Applying Topological Optimization in the Design of Uncooled Turbine Blades]. Vestnik SGAU. 2015. Vol. 14. No. 3. Part. 1. P. 139–147.
 21. Magerramova L.A. Primenenie bimetallicheskiikh bliskov, izgotavlivaemykh metodom GIP iz granuliruemykh i liteinykh nikelevykh supersplavov, dlia uvelicheniia nadezhnosti i resursa gazovykh turbin [Application of Bimetallic Blisks Manufactured by HIP from Powder and Cast Ni-base Superalloys for Gas Turbine Reliability and Life Increase]. Vestnik UGATU. 2011. Vol. 15. No. 4 (44). P. 33–38.
 22. Magerramova L.A., Stadnikov A.N. Eksperimental'noe issledovanie obratsov-imitatorov bimetallicheskogo monokolesa vysokotemperaturnoi turbiny s okhlazhdaemykh lopatkami dlia perspektivnykh gazoturbinnnykh dvigatelei [Experimental Studies of Prototype Models of Bimetallic Blisks of a High-Temperature Turbine With Cooled Blades for Advanced Gas Turbine Engines]. Vestnik SGAU. 2015. Vol. 14. No. 3. Part. 1. P. 114–121.
 23. Gurevich O.S. Perspektivnye napravleniia razvitiia SAU GTD v rabotakh GNTs TsIAM [Advanced Directions for the Development of Control System in Materials of the SSC CIAM]. Abstracts of papers. Vserossiiskaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia "Aviadvigateli XXI veka". Moscow: TsIAM. 2015. P. 859–861.
 24. Belkin Iu.S., Blizniukov L.A., Zhigunov M.M. Issledovatel'skii kompleks dlia ispytaniia demonstratsionnoi sistemy upravleniia elektroprivodami toplivnogo nasosa i mekhanizatsii kompressora [Research Complex for Testing a Demonstration of Control System for a Fuel Pump and Compressor Mechanization Electric Drive]. Sbornik "TsIAM 2001-2005. Osnovnye rezul'taty nauchno-tekhnicheskoi deiatel'nosti" ["CIAM 2001-2005. The main results of scientific and technical activities"]. In 2 volumes. Vol. 1. Edited by V.A. Skibin, V.I. Solonin, M.Ia. Ivanov. Moscow: TsIAM, 2005. 472 p.
 25. Varyukhin A. CIAM Research in Hybrid & Electric Aircraft Propulsion System Technologies. CIAM-Airbus Seminar, April 24, 2019. Moscow, Russia.

Материалы получены редакцией 23.07.2019