УДК 629.735.3(1-87)«313»:621.452

Обзор работ в США и Европе по авиационным двигателям для самолетов гражданской авиации 2020…2040-х годов

Палкин В.А.
Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва
e-mail: vapalkin@ciam.ru

Рассмотрены текущее состояние авиадвигателестроения и направления работ по созданию критических технологий для перспективной авиационной техники за рубежом. Показано, что в ТРДД ближайшей перспективы (2020…2025 гг.) будут существенно повышены параметры рабочего процесса и степень двухконтурности, а в их конструкции будут широко применяться композиционные материалы как в «холодной», так и в «горячей» частях двигателя. На среднесрочную и дальнесрочную перспективы (2030…2040 гг.) с учетом существенного прогресса в разработке компонентов электрической системы рассматриваются различные концепции летательных аппаратов с гибридной (турбоэлектрической) и электрической силовыми установками, в том числе с использованием компонентов на основе высокотемпературной сверхпроводимости.

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

Review of works in the USA and Europe on aero engines for civil aircraft of 2020…2040's

Palkin V.A.
CIAM, Moscow

The current state of aircraft engine building and areas of work on the creation of critical technologies for advanced aero engines abroad are considered. It is shown that the parameters of the cycles and the bypass ratio will be significantly increased and composite materials will be widely used in both in the "cold" and "hot" parts of the turbofan engines of short-term prospect (2020…2025). Taking into account significant progress in the development of components of the electrical system, including the components based on high-temperature superconductivity, various concepts of aircraft with hybrid (turboelectric) and electric propulsion systems are considered for the medium and long term prospects (2030…2040).

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

Введение

Самолеты гражданского назначения являются основной составляющей мирового рынка авиационной техники, выручка от реализации которых в несколько раз превышает аналогичный показатель для авиационной техники военного назначения [1].

За более чем 70-летний период развития пассажирских самолетов с реактивными двигателями достигнуто уменьшение затрат топлива на пассажиро-километр более чем на 80%, и почти 50% снижения этого показателя достигнуто за счет авиационного двигателя [2].

Улучшение показателей авиационных двигателей гражданского назначения происходит при постоянном ужесточении требований к снижению уровней шума и эмиссии вредных веществ [3, 4].

В настоящее время экологические характеристики авиационной техники являются одним из главных показателей, определяющих ее конкурентоспособность на мировом рынке и беспрепятственную эксплуатацию на международных авиалиниях.

В мировом авиадвигателестроении разработкой и выпуском законченных продуктов занято ограниченное число компаний из Америки и Европы, которые являются ведущими производителями авиационных двигателей и несут полную ответственность за их проектирование, производство, продажу и послепродажное обслуживание. К ним относятся: General Electric (отделение GE Aviation), Rolls-Royce (отделения Civil и Military), United Technologies Corporation (компании Pratt & Whitney и Pratt & Whitney Canada) и SAFRAN Group (компания Safran Aircraft Engines). Независимыми мировыми производителями с полным циклом работ по двигателям также являются компании Honeywell International (подразделение Air Transport & Regional отделения Honeywell Aerospace) и Williams International, которые поставляют двигатели для самолетов деловой авиации и региональных самолетов.

Номенклатура авиационных двигателей, выпускаемых и разрабатываемых зарубежными компаниями, достаточно широка и включает двигатели взлетной тягой $R_0 \approx 5\ldots510$ кН. Практически во всех диапазонах взлетной тяги среди производителей авиационных двигателей существует жесткая конкуренция, когда заказчику самолета свои предложения представляют две–три компании. Такая конкуренция способствует техническому прогрессу, и практически во всех диапазонах уже появились новые продукты, определяющие мировой уровень развития авиадвигателестроения [1].

Состояние двигателестроения за рубежом

По состоянию на конец мая 2018 г. лидирующее положение на рынке авиационных двигателей по всему парку пассажирских самолетов, находящихся в эксплуатации, занимали компании CFM International (совместное предприятие компаний General Electric и Safran, ~ 44%) и General Electric (~ 22%), в сегменте двигателей для магистральных узкофюзеляжных самолетов – компании CFM International (~ 71%, семейство ТРДД CFM56) и International Aero Engines (~ 19%, семейство ТРДД V2500), в сегменте двигателей для региональных самолетов – компании General Electric (~ 72%, семейство ТРДД CF34) и Rolls-Royce (~ 17%, семейство ТРДД AE3007), а в сегменте двигателей для магистральных широкофюзеляжных самолетов – компании General Electric (~ 51%, семейства ТРДД CF6, GE90 и GEnx) и Rolls-Royce (~ 28%, семейства ТРДД RB211 и Trent) (рис. 1).

Кроме двигателей компаний General Electric и Rolls-Royce в силовых установках (СУ) региональных самолетов применяются ТРДД SaM146 компании PowerJet и ТВД PW100 компании Pratt & Whitney Canada. Семейства ТРДД TFE731 компании Honeywell и ALF502/ALF507 компании Lycoming применяются в СУ региональных самолетов, выпуск которых прекращен. Новыми разработками в этом сегменте являются семейства ТРДД Passport 20 компании General Electric и PW1000G компании Pratt & Whitney.

В сегменте двигателей для СУ узкофюзеляжных магистральных самолетов кроме двигателей компаний CFM International и International Aero Engines применяются ТРДД PW6000 (A318) и PW2000 (B757) компании Pratt & Whitney и BR715 (B717) и RB211 (B757) компании Rolls-Royce. Однако выпуск самолетов B717 и B757 прекращен, а для A318 большим спросом пользовался ТРДД CFM56-5B компании CFM International. Новыми разработками в этом сегменте являются семейства ТРДД LEAP компании CFM International (на замену CFM56) и PW1000G компании Pratt & Whitney (на замену V2500).

Компания Pratt & Whitney практически утратила свои позиции в сегменте двигателей для СУ широкофюзеляжных самолетов. Она не поставляет двигатели для новых широкофюзеляжных самолетов B787, B747-8 и A350 XWB, а заказы на двигатели семейства PW4000 для СУ самолета A330 не велики. Небольшим утешением являются поставки ТРДД GP7200 в рамках совместного с General Electric предприятия Engine Alliance для СУ самолета A380, введенного в эксплуатацию в 2008 г. Новыми разработками в этом сегменте являются ТРДД GE9X компании General Electric и семейство ТРДД Trent XWB компании Rolls-Royce [1].

Со второй половины 1990-х гг. за рубежом стали вводиться в эксплуатацию широкофюзеляжные пассажирские самолеты с двигателями пятого поколения (семейства ТРДД GE90, PW4000, Trent), в которых величина суммарной степени повышения давления достигла значения $\pi^*_{к\Sigma} = 35\ldots45$, температура газа на входе в лопатки РК турбины $T^*_г = 1900\ldots1950$ K, степень двухконтурности $m = 8\ldots9$, что обеспечило снижение уровня шума и достижение в условиях крейсерского полета ($H = 11$ км, $M = 0{,}8$) величины удельного расхода топлива $C_{Rкр} \approx 0{,}52\ldots0{,}55$ кг/(кгс·ч). По сравнению с широко эксплуатируемыми в то время двигателями четвертого поколения (семейства ТРДД CF6, PW2000, RB211) эти двигатели обеспечили улучшение эксплуатационных показателей, а также высокие показатели надежности и ресурса [1].

В начале 2010-х гг. в эксплуатацию были введены новые ТРДД для широкофюзеляжных самолетов (GEnx, Trent 1000 / Trent XWB), которые по сравнению с двигателями соответствующего назначения, находящимися в эксплуатации, обеспечили уменьшение затрат топлива на 10…15%, уровня шума на 12…20 EPNдБ относительно норм Главы 4 ИКАО и запас по уровню эмиссии NO_x по циклу «взлет–посадка» 30…50% относительно норм CAEP/6 ИКАО.

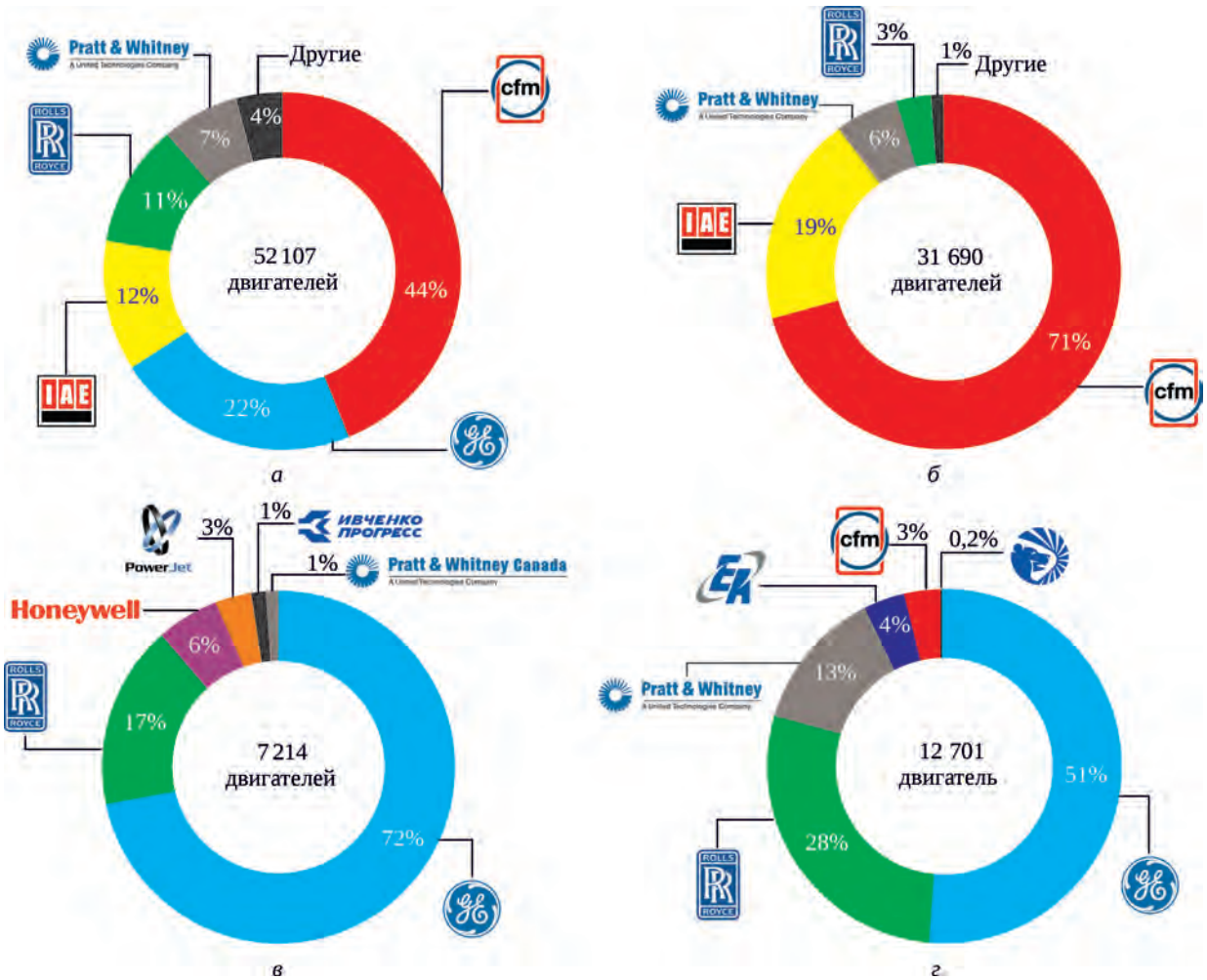


Рис. 1. Распределение парка пассажирских самолетов по производителям авиационных двигателей [5]: *а* – по всему парку; *б* – по сегменту узкофюзеляжных самолетов; *в* – по сегменту региональных самолетов; *г* – по сегменту широкофюзеляжных самолетов

Лидером в применении новых технических решений и технологий остается компания General Electric. Она первой среди авиадвигателестроительных компаний применила в серийных двигателях для пассажирских самолетов: сначала лопатки РК, а затем и корпус вентилятора из полимерного композиционного материала; КВД, рассчитанный на степень повышения давления $\pi_{к}^{*} \geq 22$; малоэмиссионные камеры сгорания (DAC, TAPS); керамические композиционные материалы (ККМ) в «горячей» части двигателя; противовращение роторов каскадов высокого и низкого давления; шевронные сопла и т.д. [1, 6 – 10].

В настоящее время компания General Electric проводит сертификационные испытания двигателя GE9X-105B1A из семейства ТРДД GE90 для нового семейства самолетов B777X компании Boeing. В этом двигателе впервые в мировой практике гражданского авиадвигателестроения применяются 11-ступенчатый КВД, рассчитанный на степень повышения давления $\pi_{к}^{*} \approx 27$ при суммарной степени повышения давления $\pi_{к\Sigma}^{*} \approx 64$, жаровая труба камеры сгорания и лопатки СА и РК второй ступени ТВД из ККМ, лопатки ТНД из алюминида титана (TiAl), изготовленные по аддитивной технологии, а также в значительной части технологии, разработанные для семейств ТРДД GEnx и LEAP (рис. 2 и рис. 3) [11 – 15].

По заявлениям компании General Electric двигатель GE9X обеспечит уменьшение затрат топлива на 10% по сравнению с самолетом B777-300ER с двигателем GE90-115B, запасы по уровню шума не менее 8 EPNдБ относительно Главы 14 ИКАО и уровню эмиссии NO_x по циклу «взлет–посадка» не менее 30% относительно норм CAEP/8 ИКАО [12, 13].

С 2015 г. в эксплуатацию вводятся новые и ремоторизованные узкофюзеляжные (региональные и магистральные) самолеты с двигателями пятого поколения (семейства ТРДД LEAP-X и PW1000G) с увеличенными параметрами рабочего процесса ($\pi_{к\Sigma}^{*} \approx 40\ldots50$, $T_{г}^{*} = 1900\ldots1950$ K) и степенью двухконтурности ($m \approx 9\ldots12$) с прямым или редукторным приводом вентилятора. По сравнению с двигателями четвертого поколения, находящимися в эксплуатации (семейства

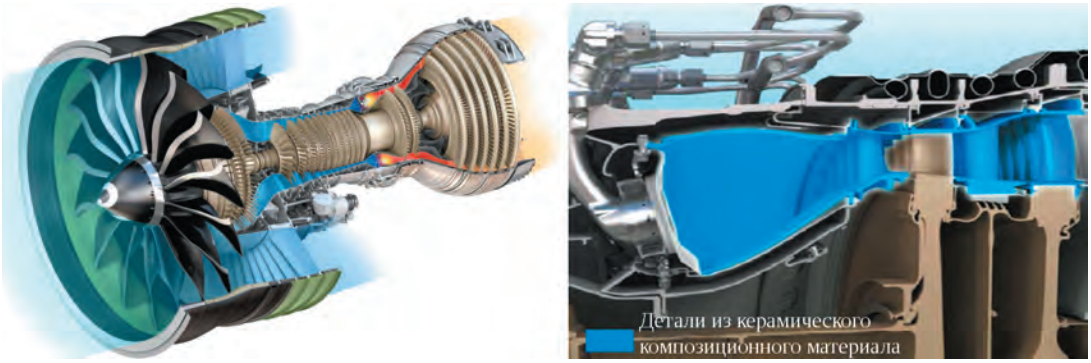


Рис. 2. Разрез ТРДД GE9X и его компоненты из керамического композиционного материала

ТРДД CF34, CFM56, V2500), они обеспечили уменьшение затрат топлива на 15…20%, уровня шума на 15…20 EPNдБ относительно норм Главы 4 ИКАО, запас по уровню эмиссии NO_x по циклу «взлет–посадка» 45…50% относительно норм CAEP/6 ИКАО и снижение стоимости технического обслуживания на 25…30%. При этом в их конструкции используются технические решения и технологии, успешно применяемые в ТРДД пятого поколения для широкофюзеляжных самолетов (прежде всего роторные и статорные детали из композиционных материалов), а также результаты работ по программам разработки перспективных технологий [1].

В семействе ТРДД LEAP-X компания CFM International впервые в мире для двигателей узкофюзеляжных самолетов применила лопатки РК и передний корпус вентилятора из полимерного композиционного материала, 10-ступенчатый КВД, рассчитанный на степень повышения давления $\pi_к^* \approx 22$, форсунки малоэмиссионной камеры сгорания TAPS II, изготовленные по аддитивной технологии, проставки над лопатками РК первой ступени ТВД из ККМ, лопатки ТНД из алюминида титана (TiAl), изготовленные по аддитивной технологии, гибридные подшипники [16 – 20].

В свою очередь компания Pratt & Whitney в семействе ТРДД PW1000G применила редуктор для привода вентилятора, что позволило использовать высокооборотную малоступенчатую ТНД. Кроме того, в семействе ТРДД PW1000G применяются вентилятор (лопатки и корпус) из композиционного материала, 8-ступенчатый КВД конструкции блиск, малоэмиссионная камера сгорания TALON X (RQL III), двухступенчатая высокооборотная ТВД ($n_{max} \approx 22\,000$ об/мин) с охлаждаемыми лопатками СА и РК, статорные детали из различных материалов, изготовленные по аддитивным техноло-

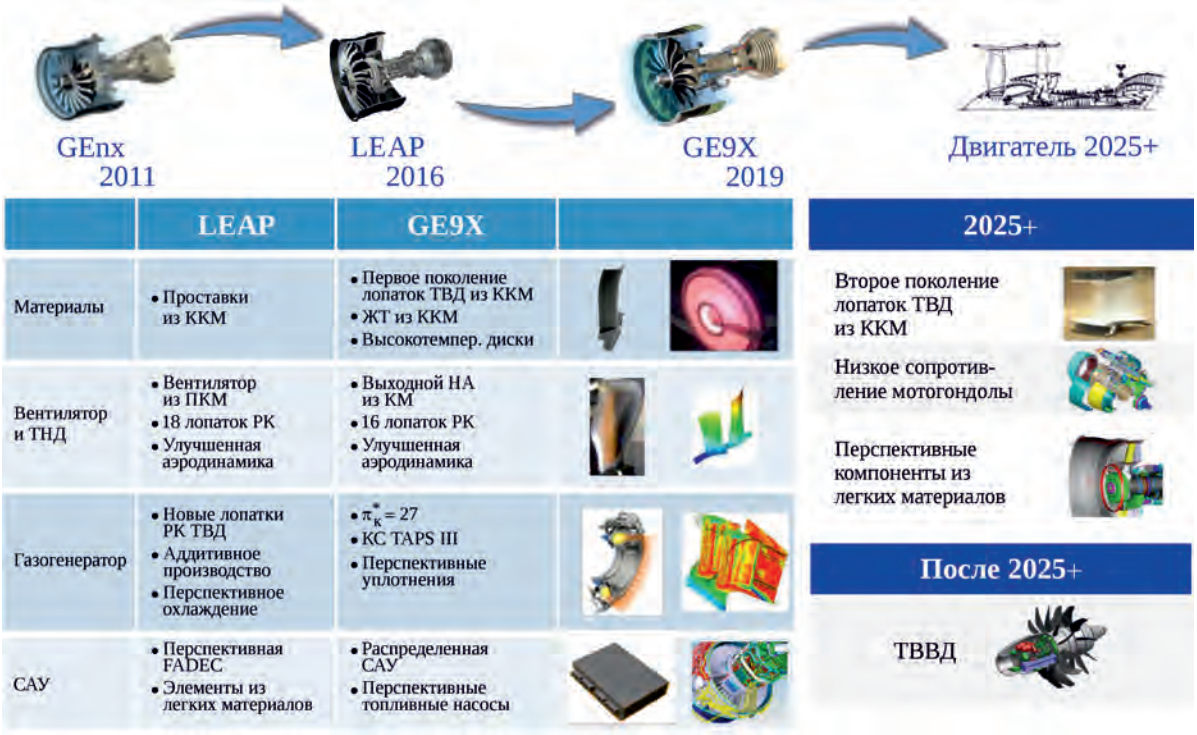


Рис. 3. Разработка перспективных технологий компанией General Electric для двигателей нового поколения

гиям. Из-за высокой температуры газа на входе в ТВД лопатки СА и РК первой ступени ТНД выполнены охлаждаемыми [21 – 26].

На рис. 4 приведено сравнение ТРДД LEAP-1A35A и CFM56-5B компании CFM International, которые применяются в СУ самолетов семейств A320neo и A320ceo, а на рис. 5 – сравнение ТРДД LEAP-1A35A и PW1133G-JM компании Pratt & Whitney, применяемых в СУ самолетов семейства A320neo [27, 28].

При одинаковом значении взлетной тяги ТРДД LEAP-1A35A по сравнению с CFM56-5B (самым большим в семействе) имеет диаметр вентилятора на ~ 250 мм, массу на ~ 535 кг и длину на ~ 728 мм больше, чем CFM56-5B. При этом максимальная окружная скорость вентилятора составляет $U_в \approx 404$ м/с ($n_{в\ max} \approx 3900$ об/мин) вместо $U_в \approx 472$ м/с ($n_{в\ max} \approx 5650$ об/мин) у CFM56-5B [27, 29].

По сравнению с ТРДД PW1133G-JM при одинаковом значении взлетной тяги ТРДД LEAP-1A35A имеет диаметр вентилятора на ~ 76 мм меньше, массу на ~ 132 кг и длину на ~ 44 мм больше. При этом максимальная окружная скорость вентилятора у LEAP-1A35A составляет $U_в \approx 404$ м/с ($n_{в\ max} \approx 3900$ об/мин), а у PW1133G-JM – $U_в \approx 353$ м/с ($n_{в\ max} \approx 3280$ об/мин) [28, 29].

Применение новых технологий в перспективных двигателях различных схем позволяет обеспечить примерно равный выигрыш по уменьшению затрат топлива и уровня шума. Поэтому предпочтение той или иной схеме двигателя зарубежные компании

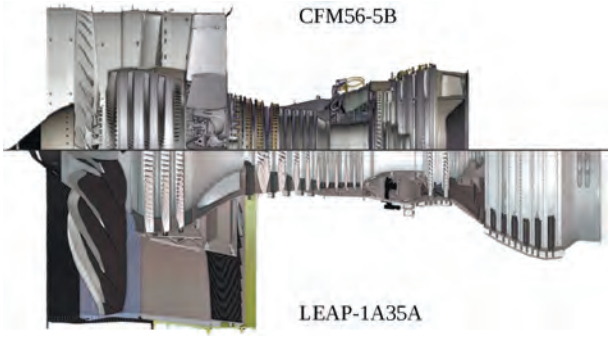


Рис. 4. Сравнение размеров ТРДД CFM56-5B и LEAP-1A

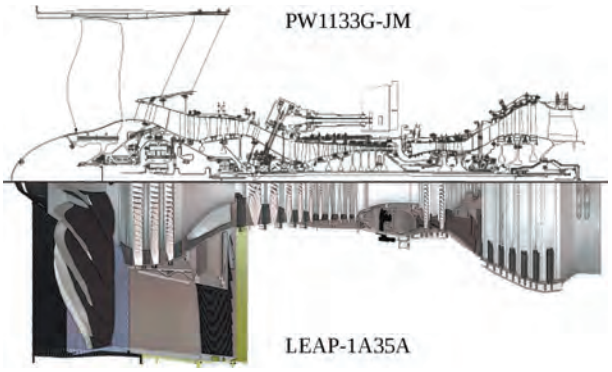


Рис. 5. Сравнение размеров ТРДД PW1133G-JM и LEAP-1A

отдают, исходя из имеющегося у них опыта и наличия необходимых технологий.

Используя научно-технический и технологический потенциал лучших производителей мира, зарубежные авиадвигателестроительные компании могут быстро реагировать на изменение ситуации на рынке и в короткие сроки создавать конкурентоспособные продукты.

Разработка критических технологий для авиадвигателей 2020…2040-х годов

Создание новых технологий играет ключевую роль в обеспечении будущей конкурентоспособности авиационной техники. За рубежом в целях достижения максимально возможного уровня технического совершенства, снижения сроков и стоимости разработки двигателей при активной поддержке государства в рамках специальных программ по созданию критических технологий проводится опережающая отработка новых технических решений. С помощью этих программ осуществляется эффективное управление технологическим развитием авиадвигателестроения и обеспечивается конкурентоспособность продукции, выпускаемой зарубежными компаниями, на мировом рынке [1].

Программы по двигателям военного и гражданского назначения взаимно дополняют друг друга, поскольку на 70…80% используют общие технологии (методы расчета, конструкторские решения, конструкционные материалы, технологические процессы и т.д.) при создании новых и модернизации находящихся в эксплуатации двигателей.

В разработке новых технологий принимают участие все ведущие зарубежные производители авиационных двигателей. Финансирование таких работ осуществляется как за счет бюджетных, так и за счет собственных средств компаний. Доля бюджетного финансирования зависит от целей программы и требуемого уровня готовности разрабатываемых технологий и составляет 50…100% стоимости работ, в то же время объемы финансирования работ из собственных средств компаний постоянно увеличиваются и составляют от 4 до 14% общей выручки [1].

В связи с усложнением авиационной техники объем финансирования программ постоянно увеличивается и в настоящее время составляет несколько миллиардов долларов США в год (бюджетные и собственные средства компаний). Если в 1960–1980-х гг. из бюджета в основном финансировались программы, связанные с разработкой технологий для двигателей военного назначения, то в последние годы значительно увеличивается финансирование программ по «двойным» технологиям и улучшению экологических характеристик авиационных двигателей [1].

Как в США, так и в Европе, все работы по созданию критических технологий, финансируемые за счет бюджетных средств, проводятся в соответствии с нормативными документами (Национальный план, Перечни стратегических исследований и т.д.), в которых для перспективных образцов авиационной техники заданы целевые индикаторы по основным показателям качества (затраты топлива, уровень шума, запас по эмиссии NO_x) во временных рамках, достижение которых возможно только при комплексном подходе, связанном с одновременным улучшением характеристик двигателя, летательного аппарата и управления воздушным движением. При этом разрабатываемые критические технологии доводятся до высокого уровня готовности TRL ≥ 6, предусматривающего создание натурных демонстраторов технологий (демонстрационные газогенераторы и двигатели) и проведение их стендовых (летных) испытаний в реальных условиях эксплуатации [30 – 41].

Целевые индикаторы, разработанные ACARE и NASA, показаны на рис. 6. Наиболее жесткие индикаторы установлены NASA. В соответствии с ними перспективные пассажирские самолеты и их СУ после 2035 г. должны обеспечить:

– уменьшение затрат топлива на 60…80% относительно лучшего в своем классе самолета 2005 г.;

– уменьшение шума на 42…52 EPNдБ относительно требований Главы 4 ИКАО;

– запас по эмиссии NO_x (цикл «взлет–посадка») более 80% относительно требований CAEP/6 ИКАО.

На рис. 7 приведена зависимость изменения удельного расхода топлива от полетного и термического КПД в условиях крейсерского полета ($H \approx 11$ км, $M \approx 0{,}8$). Из приведенных данных видно, что находящиеся в эксплуатации двигатели для узкофюзеляжных самолетов (семейства ТРДД CFM56 и V2500) имеют величину удельного расхода топлива в условиях крейсерского полета $C_{R\text{кр}} = 0{,}58…0{,}60$ кг/(кгс·ч). По сравнению с ними теоретическое уменьшение удельного расхода топлива в ТРДД может составить ~ 50% (точка пересечения линий теоретических ограничений по термическому и полетному КПД). Однако с учетом практических ограничений по термическому КПД (определяется уровнем эмиссии NO_x для малоэмиссионных камер сгорания) и полетному КПД (определяется увеличением сопротивления СУ при увеличении степени двухконтурности) это улучшение не превышает 35…40%.

По сравнению с двигателями пятого поколения (PW1000G, LEAP) максимальное уменьшение удельного расхода топлива при повышении полетного и термического КПД (одновременном повышении параметров цикла и степени двухконтурности) может составить 25…30% и быть реализовано в ТВВД, распределенной силовой установке (РСУ) или двигателе комбинированного цикла. В обычном ТРДД или $ТРДД_{сц}$ со сложным термодинамическим циклом (например, с промежуточным охлаждением) уменьшение удельного расхода топлива может составить 15…20% при повышении параметров цикла и величины степени двухконтурности до $m_0 = 14…18$ [43].

Для двигателей широкофюзеляжных самолетов (семейства ТРДД GE90, GEnx, Trent), величина удельного расхода топлива которых в условиях крейсерского полета находится на уровне $C_{R\text{кр}} = 0{,}52…0{,}55$ кг/(кгс·ч), это улучшение не превышает 25…30% [44, 45].

Дальнейшее улучшение характеристик авиационных двигателей связано с переходом к электрическому двигателю, для применения которого необходимо разработать много новых технологий.

	ACARE[1)]: Vision 2020, 2020 г.	ACARE[1)]: FlightPath 2050, 2050 г.	NASA[2)]: $N+2$, 2025…2035 гг.	NASA[2)]: $N+3$, после 2035 г.
Снижение шума	50%	65%	32…42 EPNдБ	42…52 EPNдБ
Снижение затрат топлива, %	50	75	50…60	60…80
Запас по эмиссии NO_x (цикл «взлет–посадка»), %	80	90	80	> 80

Рис. 6. Основные целевые индикаторы для перспективной авиационной техники [31, 33, 35 – 37]
[1)] снижение шума – уменьшение области распространения; затраты топлива – относительно самолета 2000 г.; запас по эмиссии NO_x – относительно CAEP/2 ИКАО; [2)] снижение шума – относительно Главы 4 ИКАО; затраты топлива – относительно самолета B777-200 с ТРДД GE90 для $N+2$ и самолета B737-800 с ТРДД CFM56-7B26 для $N+3$; запас по эмиссии NO_x – относительно CAEP/6 ИКАО

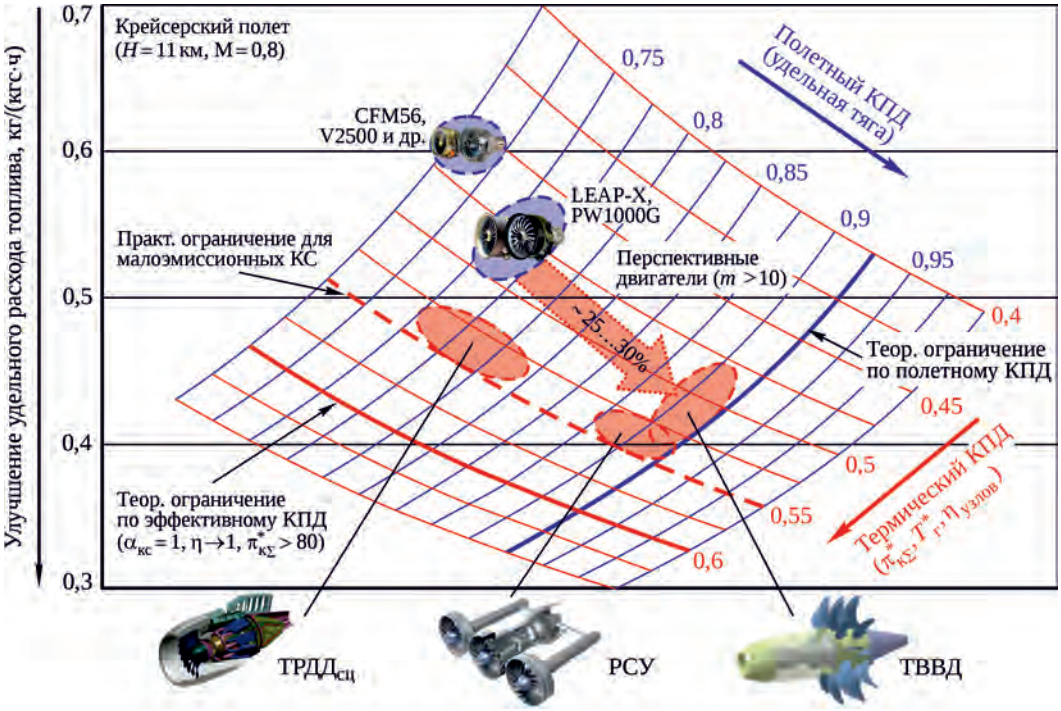


Рис. 7. Термодинамическое совершенствование турбореактивных двигателей [42, 43]

Разработка критических технологий в США. США остаются мировым лидером в разработке критических технологий для СУ летательных аппаратов различного назначения, что позволяет компаниям авиационной промышленности США занимать ведущие позиции на мировом рынке авиационной техники.

Инициаторами проведения исследований по разработке критических технологий в США являются федеральные агентства. В области газотурбинных двигателей это, прежде всего, Министерство обороны, NASA и Министерство транспорта (в лице FAA), которые формируют свою исследовательскую деятельность на основе долгосрочных прогнозов (на 25…50 лет) и стратегических планов работ. Эти планы предусматривают проведение как фундаментальных, так и прикладных исследований, к участию в которых широко привлекаются компании авиационной промышленности, университеты и институты [30 – 34].

В последние годы в США разработка новых технологий для авиационных двигателей разделена между FAA и NASA. FAA отвечает за разработку технологий на ближайшую перспективу (2015…2020 гг.), а NASA – за среднесрочную (2025…2035 гг.) и долгосрочную (после 2035 г.) перспективы [46].

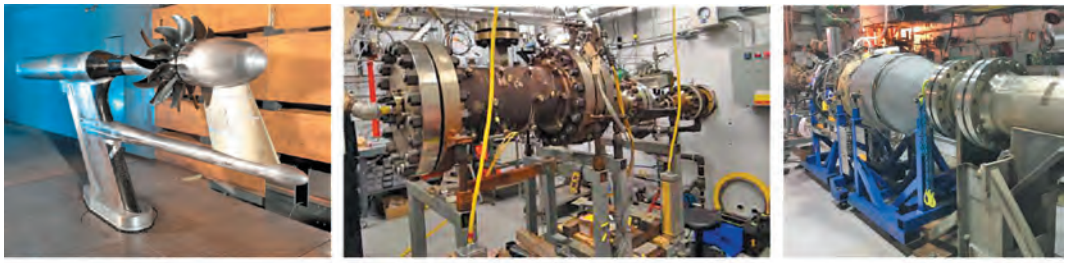
Программы CLEEN (2010…2015 гг.) и CLEEN II (2015…2020 гг.), в которых участвуют самолето- и двигателестроительные компании США, являются основным инструментом FAA для обеспечения защиты окружающей среды посредством разработки новых технологий для дозвуковых самолетов и их СУ [47, 48].

В рамках программ разрабатывались (разрабатываются) технологии с уровнем готовности TRL = 6–7, которые проходили проверку на демонстраторах технологий, некоторые из них представлены на рис. 8 и рис. 9 [49 – 57].

Разработанные технологии используются компанией General Electric в ТРДД LEAP-X и GE9X, компанией Pratt & Whitney – в семействве ТРДД PW1000G, компанией Rolls-Royce – в разрабатываемых ТРДД Advance 3 и UltraFan.

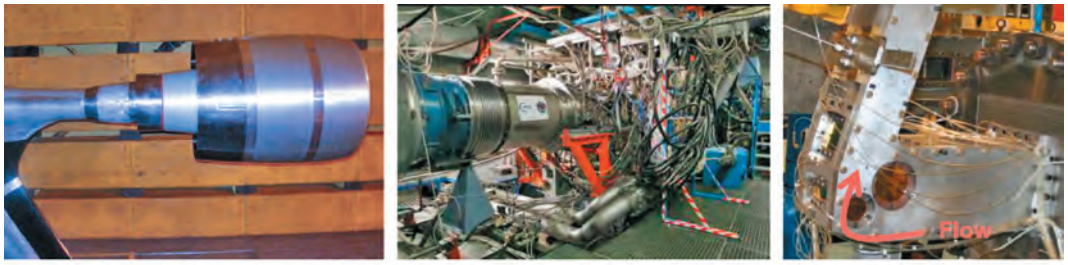
В 2008…2014 гг. в рамках программы Fundamental Aeronautics по проекту Subsonic Fixed Wing NASA проводила работы по исследованию концепций и определению ключевых технологий для дозвуковых пассажирских самолетов с началом эксплуатации в 2030…2035 гг. В работах принимали участие компании Boeing, Northrop Grumman, Cessna, General Electric, Rolls-Royce, Pratt & Whitney, а также ряд университетов и исследовательских лабораторий. В этих работах рассматривались технологии, которые к 2020…2025 гг. могут иметь уровень готовности TRL = 5–6 с доработкой их до TRL = 8–9 к 2030…2035 гг. [58 – 65].

Проведенные исследования показали, что цели NASA по уровню шума и затратам топлива являются наиболее жесткими и могут быть удовлетворены с большим трудом для ряда схем перспективных пассажирских самолетов при интеграции планера и СУ и применении новых технических решений, в то время как цели по эмиссии NO_x (цикл «взлет–посадка») могут быть удовлетворены или превышены в авиа-



а *б* *в*

Рис. 8. Испытания демонстраторов технологий:
а – модель биротативного винтовентилятора (General Electric); *б* – отсек камеры сгорания TAPS II / TAPS III (General Electric); *в* – отсек камеры сгорания (Rolls-Royce)



а *б* *в*

Рис. 9. Испытания демонстраторов технологий компании Pratt & Whitney:
а – модель вентилятора с $m > 18$; *б* – КВД; *в* – решетка лопаток ТВД

ционных двигателях обычных схем (ТВД, ТРДД) при увеличенных параметрах рабочего процесса ($\pi^*_{к\Sigma} \geq 60$, $T^*_г \geq 2000$ K) благодаря применению камеры сгорания типа LDI (TAPS). Более высокого результата (уменьшение эмиссии NO_x вплоть до нуля) можно добиться при переходе на электрифицированную СУ (гибридный двигатель), но для этого требуется разработать множество новых технологий в области электрических машин и электрооборудования [58 – 65].

Принимая во внимание, что для электрифицированных СУ перспективных самолетов необходима разработка критических технологий (прежде всего в области электрического оборудования), NASA предложила спиральный подход при их создании для летательных аппаратов различного назначения [66].

В работах 2008…2014 гг. рассматривались концепции самолетов с электрифицированными СУ с вводом в эксплуатацию к 2045 г. Однако, учитывая существенный прогресс в разработке электромоторов и электрического оборудования, NASA в 2015…2017 гг. путем объединения усилий с промышленностью в рамках проекта Advanced Air Transport Technology программы Advanced Air Vehicles Program (AAVP) провела исследования новых концепций региональных и магистральных самолетов с электрифицированными СУ с вводом в эксплуатацию в более ранние сроки (~ 2035 г.), основные параметры которых приведены в таблице, а схемы самолетов и их СУ – на рис. 10 [64 – 67].

СУ самолета STARC-ABL (Single-Aisle Turboelectric Aircraft with Aft Boundary Layer) NASA. Это самолет традиционной схемы (труба + крыло) с частично турбоэлектрической СУ, состоящей из двух расположенных под крылом ТРДД с генераторами, каждый из которых вырабатывает мощность 1,4 МВт

Таблица. Перспективные магистральные самолеты с электрифицированными силовыми установками

Самолет	Кол-во пассажиров	Число М	Тип ЛА	Тип СУ	Мощность, МВт	Состав СУ
STARC-ABL, NASA	154	0,8	труба + крыло	частично ТЭл	2…3	два ТРДД + ЭМ в хвосте
SUGAR Freeze, Boeing	154	0,7	труба + крыло с подкосом	частично ТЭл (ТЭ)	–	два ТРДД + ЭМ в хвосте
N3-X, NASA	300	0,84	гибридное крыло	ТЭл	50	два ТВГТД + 14 ЭМ на хвосте
ECO-150, ESA	150	0,7	труба + крыло	ТЭл	–	два ТВГТД + 16 ЭМ в крыле
SUGAR Volt, Boeing	154	0,7	труба + крыло с подкосом	паралл. ГЭ	1,3…5,3	два ЭМ
Концепция, СУ Rolls-Royce	154	0,7	труба + крыло	паралл. ГЭ	1,3…2,6	два ЭМ
Концепция, СУ UTRC	154	0,7	труба + крыло	паралл. ГЭ	2,1	два ЭМ

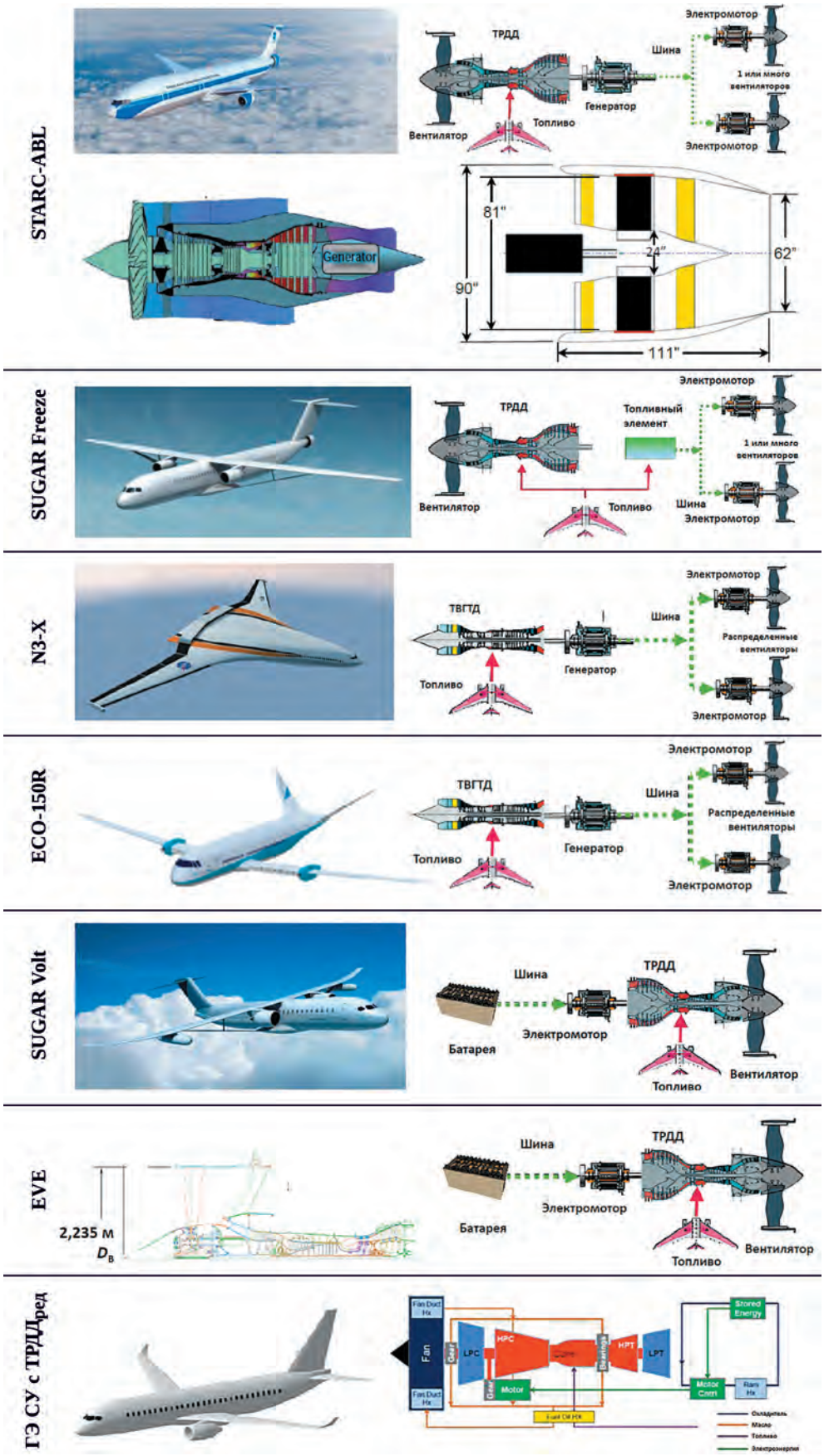


Рис. 10. Пассажирские самолеты с электрифицированными силовыми установками

с эффективностью 98%, и хвостового электроприводного вентилятора, отсасывающего пограничный слой с поверхности фюзеляжа. Электроэнергия от генераторов подается на электромотор мощностью 2,6 МВт (эффективность – 96%) привода хвостового вентилятора. В условиях взлета ТРДД производят 80% потребной тяги, а в условиях крейсерского полета – 55%.

Результаты исследований показали, что при числе Маха крейсерского полета $M_{кр} = 0,7$ применение на самолете такой СУ обеспечивает уменьшение затрат топлива на ~ 7% при дальности полета 1600 км и на ~ 12% при расчетной дальности полета 6300 км по сравнению с обычной СУ.

СУ самолета SUGAR Freeze (Subsonic Ultra Green Aircraft Research) Boeing. Компания Boeing в рамках своих исследований рассматривала большое количество концепций самолетов с различными технологиями. Концепция самолета SUGAR Freeze имеет частично турбоэлектрическую СУ, в которой питание электромотора хвостового вентилятора осуществляется от твердооксидного топливного элемента. Сочетание технологий сокращает потребление энергии на ~ 56% при дальности полета 1600 км.

СУ самолета N3-X NASA. Несколько лет назад NASA разработало концепцию самолета N3-X, в которой исследовалась возможность уменьшения затрат топлива благодаря выбору схемы летательного аппарата типа «летающее крыло» и применению полностью турбоэлектрической РСУ, включающей два турбовальных двигателя, расположенных на концах крыла, генератор и 14 электроприводных вентиляторов, установленных в задней части фюзеляжа и отсасывающих пограничный слой с его поверхности. Все компоненты электрической системы предполагают использование эффекта высокотемпературной сверхпроводимости.

Проведенные исследования показали, что самолет N3-X обеспечивает уменьшение затрат топлива на ~ 70% по сравнению с самолетом B777-200LR, из которых ~ 33% получено благодаря применению турбоэлектрической РСУ с вентиляторами, отсасывающими пограничный слой с поверхности фюзеляжа, ~ 14% – применению гибридного крыла и 23% – применению ряда других перспективных технологий. Среди исследованных ранее концепций самолетов эта обеспечивает наибольшую выгоду, но для ее реализации требуется разработка наиболее агрессивных технологий.

СУ самолета ECO-150R Empirical Systems Aerospace (ESA). ECO-150R – это концепция самолета, в котором используется среднесрочный уровень технологий для компонентов электрической системы, при этом его аэродинамические характеристики аналогичны характеристикам современных самолетов.

В рамках исследований для самолета ECO-150 рассматривался широкий спектр технологий для электрической системы – от электрических машин со сверхпроводимостью, охлаждаемых жидким водородом, до обычных электрических машин при различных уровнях технологий. В зависимости от рассматриваемых технологий характеристики ECO-150 колебались от совпадения до значительного превышения затрат топлива по отношению к современным самолетам.

СУ самолета SUGAR Volt Boeing. Для концепции самолета SUGAR Volt компания Boeing предполагает использование параллельной гибридно-электрической СУ с подкруткой вентилятора ТРДД с помощью электромотора, питание которого осуществляется от аккумуляторных батарей, с целью увеличения дальности крейсерского полета.

Такой тип самолета, но без электрической системы, позволил при дальности полета 1600 км уменьшить затраты топлива и энергии на ~ 53% по сравнению с базовым самолетом B737-800.

Концепция СУ SUGAR Volt была оценена с использованием как обычного электромотора (удельная мощность всей электрической системы 4,4…6,6 л.с./кг, эффективность 93%), так и электромотора со сверхпроводимостью (удельная мощность всей электрической системы 11…13,2 л.с./кг, эффективность 99%) при двух уровнях мощности электромотора – 1,3 МВт (1750 л.с.) и 5,3 МВт (7150 л.с.).

СУ с электромотором мощностью 1,3 МВт обеспечивает дополнительное сокращение затрат топлива на ~ 7% по сравнению с аналогичным самолетом без электрической системы и удовлетворяет цели NASA по сокращению затрат топлива на 60%.

СУ с электромотором мощностью 5,3 МВт обеспечивает достаточную мощность, чтобы ТРДД в условиях крейсерского полета работали на режиме, близком к режиму полетного малого газа. В результате этого дополнительное уменьшение затрат топлива составит ~ 10%. Однако, более крупные и тяжелые электромоторы и аккумуляторные батареи способствовали увеличению затрат энергии на ~ 8% по сравнению с аналогичным самолетом без электрической системы. Таким образом, рассматриваемая СУ позволила уменьшить затраты топлива и эмиссию вредных веществ, но ее влияние на общую энергоэффективность оказалось незначительным.

СУ с двигателем Electric Variable Engine (EVE). Компания Rolls-Royce North America (дочерняя компания Rolls-Royce) провела оптимизацию параллельной гибридно-электрической СУ на уровнях компонент, самолета и управления парком. В этой концепции СУ электромотор с питанием от аккумуляторной батареи используется для привода вентилятора при рулежке,

на режиме малого газа и для увеличения мощности при взлете. При исследовании рассматривались электромоторы мощностью 1,3…2,6 МВт. В результате было достигнуто уменьшение затрат топлива на ~ 28% при дальности полета 1600 км и до ~ 10% при дальности полета 900 км.

СУ с ТРДД с приводом вентилятора через редуктор. Научно-исследовательский центр корпорации United Technology (United Technology Research Center) исследовал параллельную гибридно-электрическую СУ, в которой применяется ТРДД с приводом вентилятора через редуктор, обеспечивающий тягу ~ 106 кН, и электромотор мощностью 2,1 МВт, соединенный с валом каскада низкого давления. Такая схема СУ позволяет приводить во вращение каскад низкого давления либо с помощью ТНД, либо с помощью электромотора, либо с помощью обоих источников одновременно. Электромотор используется для повышения мощности во время взлета и набора высоты, что приводит к меньшей размерности газогенератора, в результате чего в условиях крейсерского полета эффективность двигателя увеличивается на ~ 2,3% по сравнению с обычным ТРДД$_{ред}$. Проведенные исследования показали, что рассматриваемая СУ обеспечивает уменьшение затрат топлива на 7…9% и снижение энергопотребления на 3…5% при дальности полета 1600 км при использовании батарей с удельной мощностью 1000 кВт·ч/кг.

Кроме исследования концепций перспективных самолетов и их гибридных СУ, NASA проводит исследования в области электрических машин, поскольку они могут поддержать в ближайшей и среднесрочной перспективе разработку гибридных и электрических СУ для самолетов различного назначения [68, 69].

Основное внимание NASA уделяет электрическим машинам (генераторам и электромоторам), силовой электронике (конверторам и инверторам), а также кабелям для распределения и передачи электроэнергии при высоких уровнях тока и напряжения. В этих исследованиях удельная мощность и эффективность электрических машин являются ключевыми показателями, поскольку потери электроэнергии в них на уровне нескольких процентов приводят к киловаттам потерянной энергии.

Также NASA инвестирует средства в исследования материалов для электрифицированных СУ, которые являются основополагающими для достижений в области электрических машин и соответствующего электрооборудования.

Применение разработанных мягких магнитных материалов нового поколения для компонентов электрических систем позволит повысить эффективность работы электрооборудования (индукторов, трансформаторов, конверторов и т.д.), уменьшить магнитные потери и размеры компонентов на системном уровне.

а

б

Рис. 11. Демонстраторы электрифицированных технологий NASA:
а – LEAPTech; *б* – X-57 Maxwell

Силовые кабели могут составлять значительную часть массы электрифицированной СУ и являются еще одной областью, в которой исследования материалов являются крайне важными. Рассматриваются три направления для уменьшения массы кабеля: работа при высоком напряжении; применение обычных проводников с удельной проводимостью выше, чем у меди; применение проводников со сверхпроводимостью. Успех этих направлений в значительной степени зависит от разработки изоляционных материалов, а также исследования материала с высокой проводимостью с использованием Cu-C-нанотрубок (Cu-CNT).

На протяжении ряда лет ведутся исследования по разработке проводников со сверхпроводимостью с возможностью передачи переменного тока на частотах в несколько сотен герц, в результате которых получены обнадеживающие результаты. Такие сверхпроводники можно использовать для обмоток электромоторов или распределительных кабелей.

Для проверки разработанных и разрабатываемых технологий создаются демонстраторы технологий, некоторые из которых показаны на рис. 11 [70 – 76].

Исследования NASA в области электрифицированных СУ позволят значительно улучшить характеристики электрической системы, а их результаты могут найти широкое применение и в других областях энергетики.

Разработка критических технологий в Европе. Европейские страны несколько позже, чем США, приступили к выполнению программ по созданию

критических технологий в области авиации. Эти работы проводятся под эгидой Еврокомиссии в виде Рамочных программ и нацелены на обеспечение конкурентоспособности выпускаемой в Европе авиационной техники. Крупномасштабная разработка критических технологий в области авиационной техники началась в Пятой рамочной программе (FP5, 1998…2005 гг., первоначальный срок – 1998…2002 гг.) и в настоящее время продолжается в Восьмой рамочной программе (Horizon 2020, планируемый срок – 2014…2020 гг.) [35 – 40].

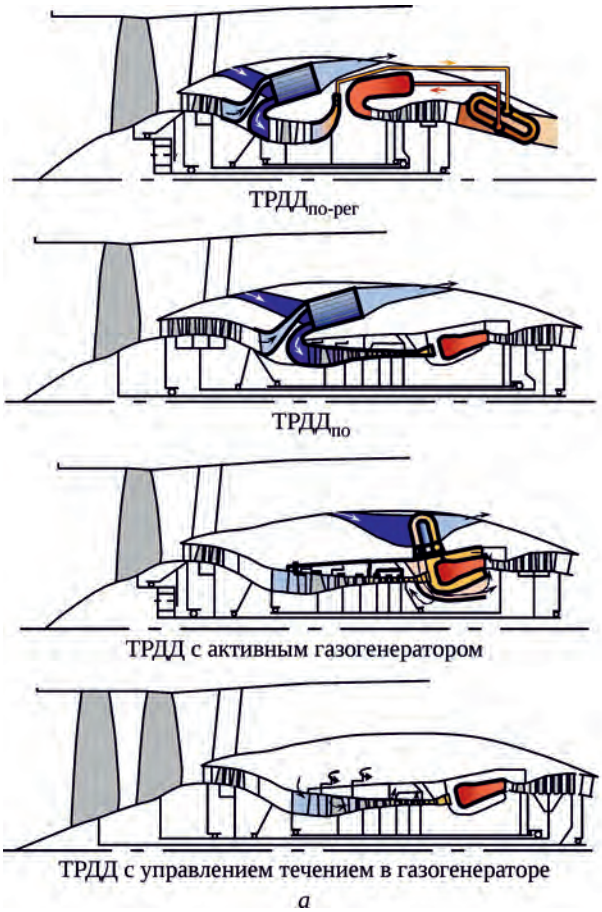
В рамках Шестой (проекты VITAL, NEWAC, DREAM) и Седьмой (проекты LEMCOTEC, ENOVAL, E-BREAK) рамочных программ разрабатывались критические технологии для авиационных двигателей СУ пассажирских самолетов 2020…2025 гг., которые обеспечили бы достижение целевых индикаторов, установленных ACARE в Vision 2020. В этих проектах координаторами работ были компании Rolls-Royce, Safran и MTU Aero Engines.

Рассмотренные в проектах схемы двигателей и критические технологии для компрессоров и турбин показаны на рис. 12 и рис. 13 [77 – 82].

Используя результаты своего участия в Рамочных программах компания Rolls-Royce в 2015 г. приступила к отработке критических технологий для перспективных двигателей 2020…2025+ гг., выбрав для этого поэтапную стратегию развитии схемы двигателя (рис. 14).

На первом этапе компания, используя существующие и разрабатываемые в рамках специализированных программ технологии, сосредоточила свои усилия на разработке трехвального ТРДД с прямым приводом вентилятора, в котором для повышения термического и полетного КПД будут реализованы высокие значения степени двухконтурности $m > 11$, суммарной степени повышения давления $\pi^*_{к\Sigma} \geq 60$ и температуры газа на входе в ТВД $T^*_г > 2000$ К. Благодаря этому ожидается, что расход топлива будет уменьшен на ~ 20% по сравнению с ТРДД Trent 700. Двигатель получил название Advance и на его базе будут разрабатываться ТРДД для широкофюзеляжных самолетов взлетной тягой $R_0 \approx 330…470$ кН.

На втором этапе компания сосредоточит свои усилия на разработке двухвального ТРДД с приводом вентилятора через редуктор, в котором для повышения терми-



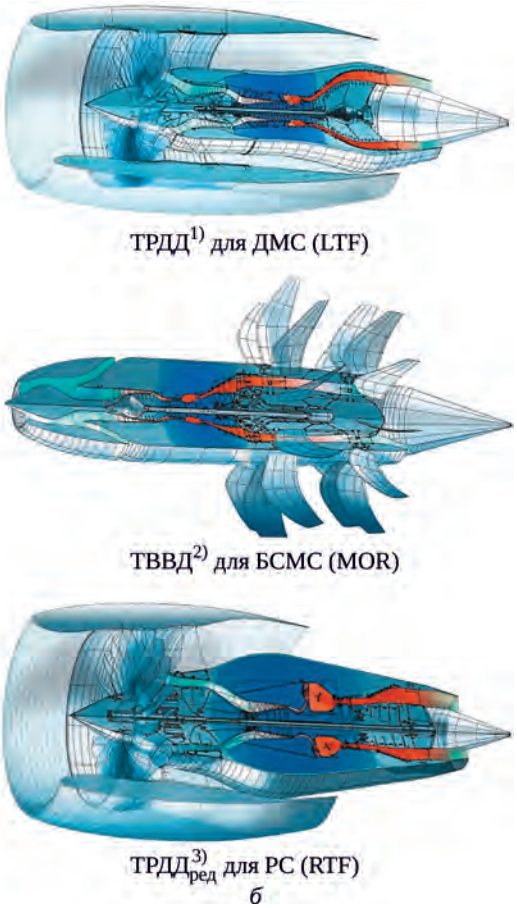


Рис. 12. Схемы перспективных двигателей, рассмотренные в проектах EWAC (*а*) и LEMCOTEC (*б*)
[1)] КСД – 5 ступеней, КВД – 10 ступеней, КС – малоэмиссионная, ТВД – 2 ступени, ТСД – 1 ступень, ТНД – 8 ступеней;
[2)] биротативный ВВ – 2 ступени, КСД – 7 ступеней, КВД – 5 ступеней, ТВД – 1 ступень, ТСД – 2 ступени, СТ – 3 ступени;
[3)] КВД – 5 осевых + 1 центробежная ступень, КС – малоэмиссионная, ТВД – 2 ступени, ТНД – 4 ступени

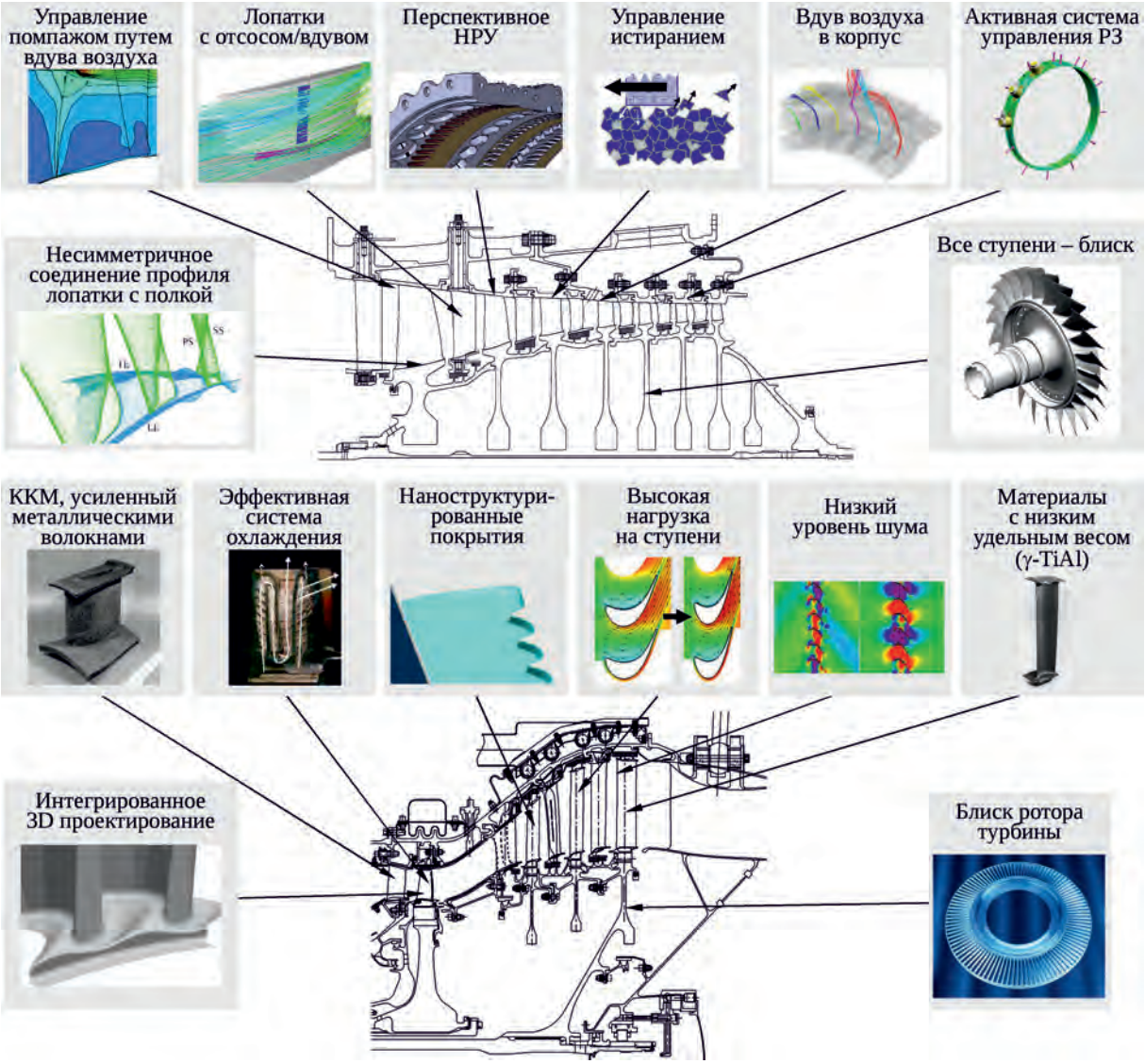


Рис. 13. Критические технологии для компрессоров и турбин перспективных двигателей

Начало эксплуатации	2020+	2025+
Степень двухконтурности	11+	15+ / 50
Суммарная степень сжатия	60+	70+
Эффективность (отн. Trent 700), %	20+	25+ / 30

Рис. 14. Стратегия компании Rolls-Royce по разработке перспективных двигателей 2020…2025+ гг. [83 – 88]

ческого и полетного КПД будут реализованы высокие значения степени двухконтурности $m > 15$, суммарной степени повышения давления $\pi^*_{к\Sigma} \geq 70$ и температуры газа на входе в ТВД $T^*_г > 2000$ К. Благодаря этому ожидается, что по сравнению с ТРДД Trent 700 расход топлива будет уменьшен на ~ 25%. Этот ТРДД получил название UltraFan и на его базе будут разрабатываться двигатели для узко- и широкофюзеляжных самолетов взлетной тягой $R_0 \approx 110…445$ кН [89 – 91].

В дальнейшем в зависимости от ситуации на рынке Rolls-Royce может предложить заказчикам и ТВВД (Open Rotor).

ТРДД Advance и UltraFan создаются на базе нового газогенератора, в котором по сравнению с газогенератором ТРДД Trent XWB перераспределена работа между каскадами среднего и высокого давления. В результате в ТРДД Advance будет применяться двухвальный газогенератор (4+10÷2+1), а в ТРДД UltraFan – одновальный (10÷2) и КСД будет выполнять роль подпорных ступеней с приводом от ТНД.

Критические технологии для ТРДД Advance и UltraFan приведены на рис. 15 и рис. 16 [89 – 91].

Оба двигателя являются результатом участия компании Rolls-Royce в программах разработки крити-

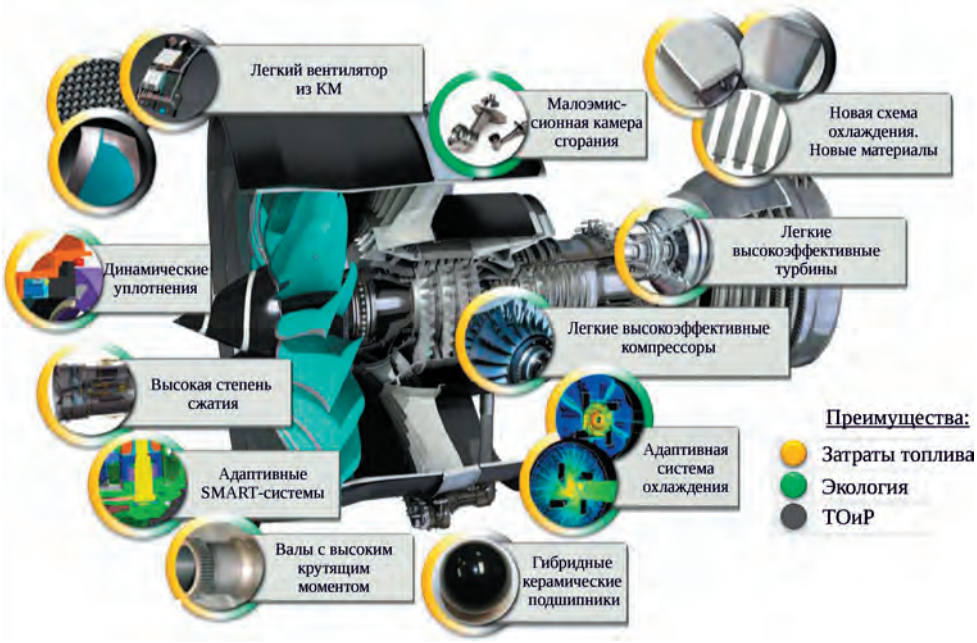


Рис. 15. Конструктивные особенности ТРДД Advance, Rolls-Royce

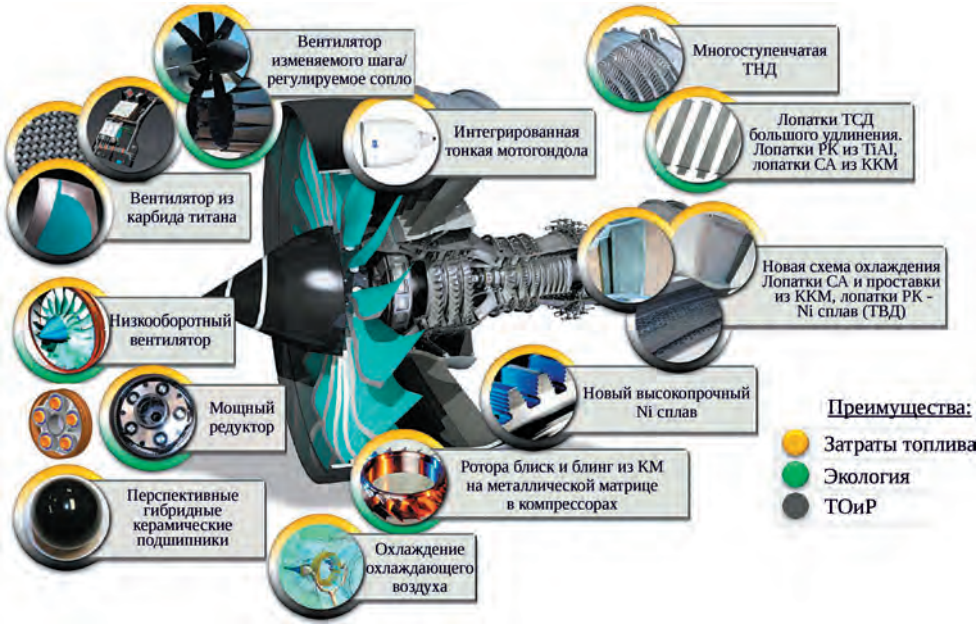


Рис. 16. Конструктивные особенности ТРДД UltraFan, Rolls-Royce

ческих технологий, в рамках которых были созданы демонстраторы технологий и проведены их испытания [88 – 93]. Участие в программах осуществляется как за счет собственных (в последние годы компания инвестирует в НИОКР приблизительно 1 млрд. фунтов ст. в год), так и бюджетных средств (активное участие в программах и проектах Европы – FP7, Clean Sky, Clean Sky 2 и США – HEETE, ADVENT, SFW, CLEEN и т.д.).

Для исследования разработанных и разрабатываемых технологий компания Rolls-Royce на базе нового газогенератора с использованием вентилятора ТРДД Trent XWB-84 и ТНД ТРДД Trent 1000 создала демонстрационный двигатель Advance 3. В ходе первого этапа испытаний, который завершился в сентябре 2018 г., демонстрационный двигатель наработал 100 ч и показал ожидаемые результаты по эффективности газогенератора и камеры сгорания. Кроме того, компания ведет автономные испытания редуктора, 10-ступенчатого компрессора, малоэмиссионной камеры сгорания и ТВД [93, 94].

Компания Safran направила свои усилия на разработку технологий для ТВВД. В рамках направления Sage 2 программы Clean Sky был разработан натурный демонстратор ТВВД тягой $R_0 = 102$ кН с биротативным винтовентилятором диаметром $D_{ВВ} = 4$ м и проведены его испытания на открытом стенде. Критические технологии, разработанные компанией, и ТВВД на стенде показаны на рис. 17.

В ходе испытаний демонстрационного ТВВД были получены данные по уровню шума, которые обеспечили запас в ~ 3 EPNдБ относительно Главы 14 ИКАО (рис. 18). По оценке компании Safran при установке такого двигателя на самолет можно ожидать обеспечение запаса по уровню шума в ~ 7…8 EPNдБ относительно Главы 14 ИКАО, что делает ТВВД весьма привлекательным с учетом его высокой экономичности.

Компания MTU Aero Engines, тесно сотрудничающая с компанией Pratt & Whitney по семейству ТРДД PW1000G, разрабатывает в рамках программ Clean Sky и Clean Sky 2 технологии, направленные на повышение эффективности ТРДД с приводом вентилятора через редуктор (рис. 19).

В рамках Восьмой рамочной программы (Horizon 2020) рассматриваются концепции двигателей, которые

Рис. 17. Критические технологии демонстрационного ТВВД (*а*) и его установка на стенде (*б*) [95, 96]

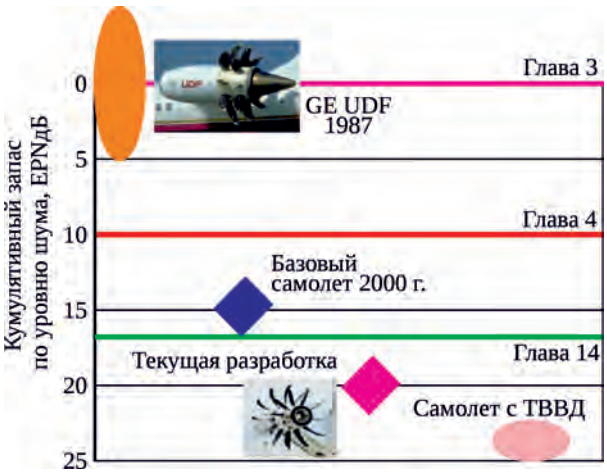


Рис. 18. Запас ТВВД по уровню шума

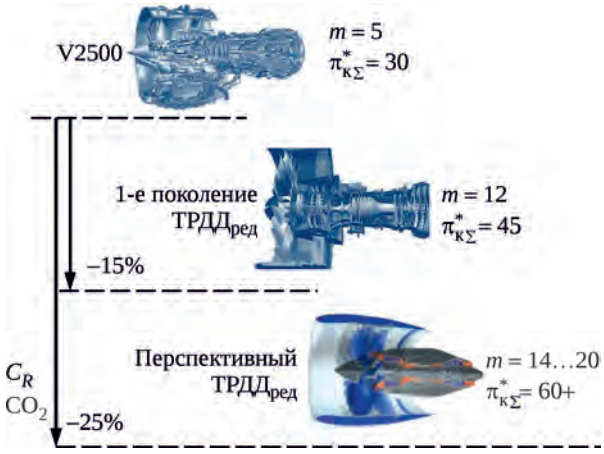


Рис. 19. Демонстратор технологий ТРДД$_{ред}$ компании MTU Aero Engines [96, 97]

могут удовлетворить целевым индикаторам ACARE 2050 г. Для их достижения рассматриваются три направления исследований – повышение эффективности термодинамического цикла, электрификация СУ и применение альтернативных видов топлива с низким содержанием углерода [98].

Одна из возможных схем двигателя, рассматриваемая в проекте ULTIMATE, показана на рис. 20. По существу, это известная схема поршневого двигателя с турбонаддувом, на которую взглянули новыми глазами и приспособили к новым условиям. Впервые такая схема двигателя была предложена и реализована главным инженером компании Napier Nomad Ernest E. Chatterton в 1953 г.

Благодаря наличию поршневой группы в таком двигателе можно получить очень высокие параметры термодинамического цикла ($\pi^*_{к\Sigma} \approx 100$, $T^*_г \approx 2500$ К) и тем самым существенно повысить его эффективность. При этом поршневая группа может использоваться либо для повышения параметров цикла, либо для привода вала с движителем, либо для обеих целей одновременно. По оценке в условиях крейсерского полета ($H \approx 11{,}7$ км, $M \approx 0{,}73$) такой двигатель может обеспечить удельный расход топлива $C_{R\,кр} \approx 0{,}414$ кг/(кгс·ч) [102].

По программе Horizon 2020 в рамках проектов по электрификации СУ (ASuMED, MAHEPA, H3PS, CENTERLINE и др.) разрабатываются: электромотор мощностью 2 МВт и компоненты электрической системы с высокотемпературной сверхпроводимостью (рис. 21,*а*); варианты последовательной гибридно-электрической СУ с питанием электромотора от генератора, установленного на валу поршневого двигателя, и от батареи топливных элементов для четырехместного самолета; гибридно-электрическая СУ с электроприводным хвостовым вентилятором (рис. 21,*б*); компоненты электрической системы [103 – 106].

Среди европейских компаний инициатором разработки самолетов с электрифицированными СУ в рамках проектов «E-aircraft projects» является компания Airbus Group. Основные научно-исследовательские работы по этому направлению проводило подразделение компании Airbus Innovations (корпоративная исследовательская сеть компании Airbus Group). На рис. 22 показаны основные направления работ компании с партнерами по созданию таких пассажирских самолетов.

Наряду с исследованиями электрифицированных СУ проводятся работы и по разработке компонентов электрической системы. Одним из мировых лидеров в данном направлении была компания Siemens (в июне 2019 г. ее подразделение по электрическим и гибридно-электрическим СУ eAircraft приобрела компания Rolls-Royce), которая разработала электромоторы мощностью 60…300 кВт с удельной мощностью около 6 кВт/кг, а также инверторы (рис. 23).

Компания Safran разработала электромотор мощностью 45 кВт с удельной мощностью 2,5 кВт/кг, предназначенный для прямого привода винта, и турбогенератор мощностью 600 кВт с удельной мощностью 8 кВт/кг, предназначенный для подачи тепловой и/или электрической энергии к многочисленным электроприводным винтам распределенной СУ в зависимости от участка траектории полета (рис. 24).

Также в Европе разрабатываются демонстраторы технологий на базе легких самолетов с гибридно-электрическими СУ для проведения летных испытаний (рис. 25).

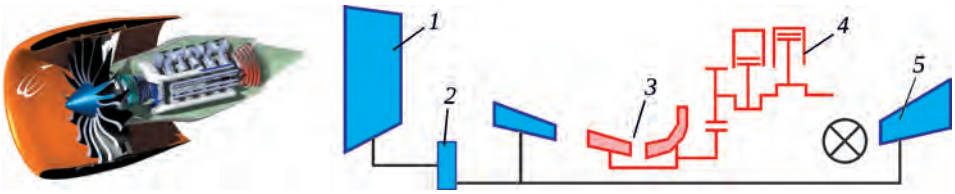
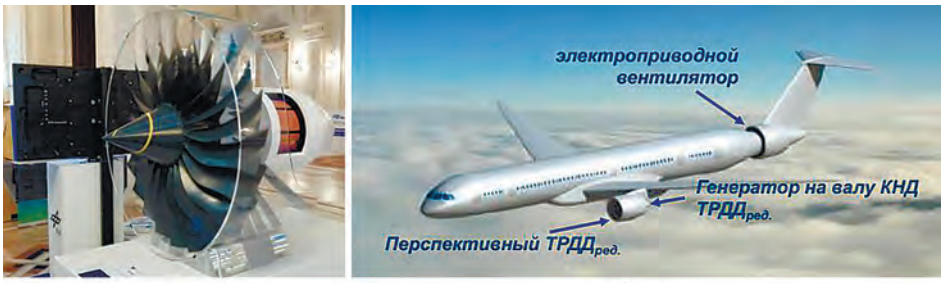


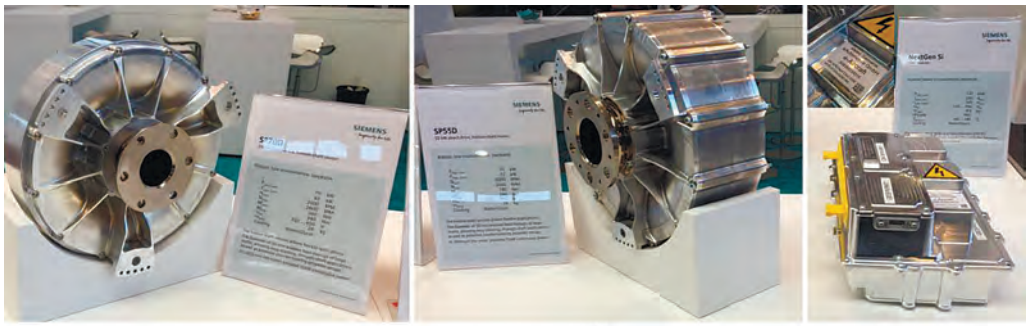
Рис. 20. Гибридный двигатель проекта ULTIMATE программы Horizon 2020 [99 – 101]:
1 – вентилятор ($D_в = 2{,}87$ м); *2* – редуктор; *3* – осецентробежный КВД (2+1);
4 – четырехтактный V-образный ПД; *5* – 5-ступенчатая ТНД



а *б*

Рис. 21. Электромотор с использованием эффекта высокотемпературной сверхпроводимости по проекту ASuMED (*а*) и концепция самолета с электроприводным хвостовым вентилятором по проекту CENTERLINE (*б*)

Рис. 22. Основные направления работ компании Airbus Group с партнерами по созданию пассажирских самолетов с электрифицированной силовой установкой [107 – 112]



а *б* *в*

Рис. 23. Электромоторы (*а*, *б*) и инвертор (*в*) компании Siemens [113, 114]

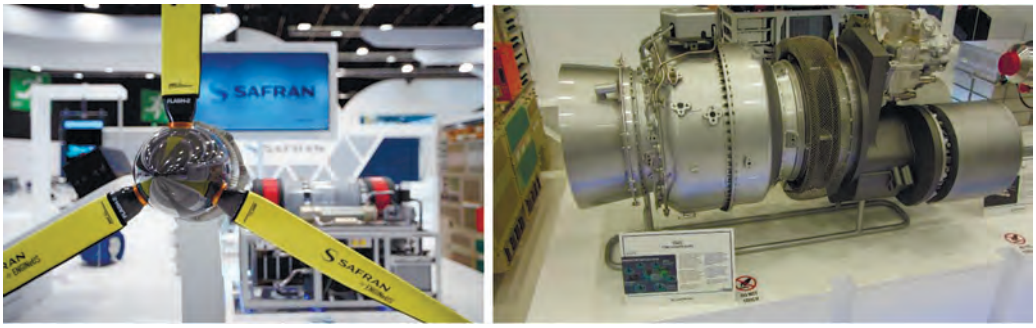


Рис. 24. Электромотор и турбогенератор компании Safran (фото автора)

а *б*

Рис. 25. Демонстраторы технологий с гибридно-электрическими СУ [115, 116]:
а – 4/6-местный самолет Cassio компании VoltAero; *б* – 9-местный самолет Alice компании eVIATION

Заключение

Создание новых технологий играет ключевую роль в обеспечении будущей конкурентоспособности авиационной техники, выпускаемой зарубежными компаниями.

За рубежом при активной поддержке государства в целях достижения максимально возможного уровня технического совершенства, снижения сроков и стоимости разработки двигателей в рамках специальных программ проводится опережающая отработка критических технологий. С помощью этих программ осуществляется эффективное управление технологическим развитием авиастроения и государства.

В этих программах разрабатываются критические технологии на ближайшую (2020…2025 гг.), среднесрочную (2025…2035 гг.) и дальнесрочную (после 2035 г.) перспективы. Разрабатываемые технологии предназначены для применения в двигателях как традиционных схем (ТРДД с прямым или редукторным приводом вентилятора, ТВВД), так и новых схем (двигатели комбинированного цикла, гибридные и электрические двигатели), в том числе с использованием альтернативного топлива с низким содержанием углерода.

В настоящее время все ведущие зарубежные авиадвигателестроительные компании участвуют в программах по разработке критических технологий в обеспечение создания двигателей нового поколения, СУ с которыми будут максимально интегрированы с летательным аппаратом, а по своим показателям двигатели будут существенно превосходить ТРДД пятого поколения. Применяемые в них технологии будут направлены не только на уменьшение затрат топлива (энергии), уровня шума и эмиссии вредных веществ, но и на снижение всех составляющих стоимости жизненного цикла.

Литература / References

1. Палкин В.А., Солонин В.И., Скибин В.А. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний в обеспечение создания перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / Под общей ред. В.А. Скибина и В.И. Солонина. М.: ЦИАМ, 2010. 678 с.
   Palkin V.A., Solonin V.I., Skibin V.A. Raboty vedushchikh aviadvigatelestroitel'nykh kompanii v obespechenie sozdaniia perspektivnykh aviatsionnykh dvigatelei (analiticheskii obzor) [Activity of Leading Aircraft Engine Companies for Creation of Advanced Aircraft Engines (Analytical Review)]. Edited by V.A. Skibin, V.I. Solonin. Moscow: TsIAM, 2010. 678 p.
2. Aerospace & Defense. 2011 Year in Review and 2012 Forecast. Issue 2, February, 2012. PricewaterhouseCoopers LLP.
3. The Sustainability of UK Aviation: Trends in the Mitigation of Noise and Emissions. Indep. Trans. Comm. March 2016.
4. Madden P. CAEP Combustion Technology. Review Process and CAEP NO_x Goals. 2 July 2014. Rolls-Royce. 2014.
5. Commercial Engines 2018. Turbofan Focus. FlightGlobal. 2018.
6. Rouaud L. GE Aviation. Technology Innovation to Power the Next Generation Widebody Aircraft. September 2012. GE Aviation.
7. GEnx™ High Bypass Turbofan Engine. Data Sheet. 2014. GE Aviation.
8. GE's GEnx Engine Unveiled at Paris Air Show. Press Release. June 15, 2009. GE Aviation.
9. Boeing 777X. Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_777X)
10. General Electric GE90. Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/General_Electric_GE90)
11. GE Aviation Jefferies Investor Visit. May 12, 2014. GE Aviation.
12. GE Aviation. Deutsche Bank Industrial Conference. June 05, 2014. GE Aviation.
13. GE9X Technology Validated As Program Gathers Pace. AINonline. July 14, 2014 (http://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2014-07-14/ge9x-technology-validated-program-gathers-pace)
14. Rockstroh T.J. GE Aviation. Additive Manufacturing Overview. Evolution to Revolution. LAM 2014. March 2014. GE Aviation.
15. Wadia A.R. Technologies for the Next Engine Generation. September, 2014. GE Aviation.
16. Bachelet E. Advanced Technology Engines for the Next Generation of Aircraft. 27th Annual Conference. 15 March 2010. CFM International.
17. Next-gen Engine Technology. Implications for Maintenance. February 2014. Aero Engine USA, CFM International. 2014.
18. Jean-Paul Ebanga LEAP. Proven Breakthrough. ISTAT. March 11, 2013.
19. LEAP. Latin America & Caribbean Engineering & MRO Summit. October 17–18, 2012. Sao Paulo, Brasil. CFM Int.
20. Propelling Forward. Current & New Engine Technologies Helping to Reduce Maintenance Costs MRO Europe – Amsterdam. October 10, 2012. CFM International.

21. PurePower® Family of Engines. Pratt & Whitney. 2014.
22. Atsushi S., Mitsuo I., Tetsuji F. Development of PW1100G-JM Turbofan Engine. IHI Engineering Review. Vol. 47. No. 1. 2014. P. 23–28.
23. Boyer J. Additive Manufacturing. April 7, 2015. Pratt & Whitney, 2015.
24. Printed Parts Will Be Used in Jet Engines. Rapidreadytech. April 2015 (https://www. rapidreadytech.com/2015/04/printed-parts-will-be-used-in-jet-engines/)
25. The PurePower® PW1000G Engine. MRO Summit Panama – 2014. Pratt & Whitney. 2014.
26. PurePower® PW1000G Program Review. October 2013. Pratt & Whitney.
27. Type-Certificate Data Sheet. No. E.067. Issue: 01 for CFM International CFM56-5 Engines. 18 May 2009. EASA.
28. Type-Certificate Data Sheet. No. E.093. Issue: 02 for PW1100G-JM Series Engines. 23 November 2015. EASA.
29. Type-Certificate Data Sheet. No. E.110. Iss.: 01 for Engine LEAP-1A & LEAP-1C Series Engines. 30 Nov. 2015. EASA.
30. National Aeronautics Research and Development Policy. Advancing U.S. Technological Leadership. Aeronautics Science and Technology Subcommittee. Committee on Technology. National Science and Technology Council. December 2006.
31. National Plan for Aeronautics Research and Development and Related Infrastructure. Aeronautics Science and Technology Subcommittee. Committee on Technology. National Science and Technology Council. December 2007.
32. National Plan for Aeronautics Research and Development and Related Infrastructure. Aeronautics Science and Technology Subcommittee. Committee on Technology. National Science and Technology Council. February 2010.
33. Technical Appendix. National Plan for Aeronautics Research and Development and Related Infrastructure. Aeronautics Science and Technology Subcommittee. Committee on Technology. National Science and Technology Council. December 2008.
34. National Aeronautics Research, Development, Test and Evaluation (RDT&E) Infrastructure Plan. Aeronautics Science and Technology Subcommittee. Committee on Technology. National Science and Technology Council. January 2011.
35. Borghese J. NASA Advisory Council Aeronautics Committee Report. December 11, 2018. NASA Headquarters. 2018.
36. European Aeronautics: A Vision for 2020. Meeting Society's Needs and Winning Global Leadership. Report of the Group of Personalities. European Commission. January, 2001.
37. Flightpath 2050. Report of the Group of Personalities. European Commission. March, 2011.
38. The Strategic Research Agenda. ACARE. October, 2002.
39. The Strategic Research Agenda. ACARE. October, 2004.
40. Strategic Research and Innovation Agenda. Value 1 & 2. ACARE. 2012
41. Strategic Research and Innovation Agenda. Value 1 & 2. ACARE. 2017.
42. Arndt No. Environmentally Friendly Aero-Engines for the 21st Century. CEAS Berlin. 12th September, 2007. Rolls-Royce Deutschland.
43. Бабкин В.И., Палкин В.А. Современные технологии ЦИАМ: на грани стихий. Крылья Родины. 2016. № 7–8. С. 40–44. Babkin V.I., Palkin V.A. Sovremennye tekhnologii TsIAM: na grani stikhii [Actual Technologies of CIAM: on the Edge of Possible]. Kryl'ia Rodiny. No. 7–8. 2016. P. 40–44.
44. Luongo C., Masson Ph.J., Nam T. et al. Next Generation More-Electric Aircraft: A Potential Application for HTS Superconductors. IEEE Transactions On Applied Superconductivity. Vol. 19. No. 3. June, 2009.
45. Thrust-specific fuel consumption. Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Thrust-specific_ fuel_consumption)
46. Strazisar T. Environmentally Responsible Aviation (ERA) Project, Integrated Systems Research Program. NRC Meeting of Experts. May 14–15, 2009. NASA. 2009.
47. Skalecky J. CLEEN (Continuous Lower Energy, Emissions and Noise). Program Technologies Development. January 4, 2010. Federal Aviation Administration.
48. Fact Sheet – Continuous Lower Energy, Emissions, and Noise (CLEEN) Program. June 4, 2019. FAA.
49. Niskodem P.M., Stickles R., Allmon B., DeJong R. CLEEN Consortium Open Session. October 27, 2010. GE Aviation.
50. FAA CLEEN. October 27, 2010. Pratt & Whitney.
51. Skinner J. FAA Continuous Lower Energy, Emissions & Noise (CLEEN) Technologies. Rolls-Royce Program Overview. 27 October 2010. Rolls-Royce.
52. Bult J. CLEEN Systems Integration. November 19, 2014. GE Aviation.
53. P&W FAA CLEEN Update. November, 2014. Pratt & Whitney.
54. FAA CLEEN Technologies. Rolls-Royce Program Overview. 19 November, 2014. Rolls-Royce.
55. FAA CLEEN Consortium Public Plenary Session. May 4, 2016. GE Aviation.
56. P&W CLEEN Technology Demonstrator. CLEEN II: High Performance Core. United Technologies Corporation. 2017.

57. Belcher B. Rolls-Royce CLEEN II. Low Emission Combustion Technology. 7 November 2018. CLEEN II Consortium Public Day, Washington DC.
58. $N+3$ Small Commercial Efficient & Quiet Air Transportation for Year 2030-2035. GE/Cessna/Georgia Tech Team. Final Report. April 22, 2010. NASA. 2010.
59. D'Angelo M., Gallman J., Johnson V. et al. $N+3$ Small Commercial Efficient and Quiet Transportation for Year 2030-2035. NASA/CR–2010-216691. NASA. 2010.
60. NASA $N+3$. MIT Team Final Review. 23 April 2010. NASA Langley Research Center.
61. Bruner S. $N+3$ Phase I Final Review. NASA Glenn Research Center. 21 April 2010. Northrop Grumman Corporation.
62. Jankovsky A. NASA Hybrid Gas-Electric Subproject Overview. Interchange with Meggitt Aircraft Braking systems. Aug 31, 2016. NASA. 2016.
63. Jansen R.H., Bowman Ch., Jankovsky A. et al. Overview of NASA Electrified Aircraft Propulsion Research for Large Subsonic Transports. Paper for AIAA Technical Conferences. AIAA. 2017.
64. NASA Moves Electric-Propulsion Components Closer To Reality. Aviation Week & Space Technology. Fri, 2017-08-25.
65. Felder J.L. NASA Electric Propulsion System Studies. NASA. 2017.
66. Jankovsky A. Hybrid Gas-Electric Subproject Overview. Interchange with Meggitt Aircraft Braking systems. August 31, 2016. NASA. 2016.
67. Jansen R.H., Bowman Ch., Jankovsky A. et al. Overview of NASA Electrified Aircraft Propulsion Research for Large Subsonic Transports. Paper for AIAA Technical Conferences. AIAA. 2017.
68. Kim H.D., Perry A.T., Ansell Ph.J. A Review of Distributed Electric Propulsion Concepts for Air Vehicle Technology // Proceedings of the AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium, EATS 2018. US, Cincinnati. P. 77–97.
69. Yoon A., Yi X., Martin J., Chen Y., Haran K. A High Speed, High Frequency, Air Core PM Machine for Aircraft Application // Proceedings of the IEEE Power and Energy Conference. Urbana, Illinois. February 19–20, 2016. P. 1–4.
70. Stoll A.M., Bevirt J.B., Moore M.D. et al. Drag Reduction Through Distributed Electric Propulsion. Aviation Technology, Integration and Operations Conference. 16–20 June 2014. Atlanta, Georgia. AIAA. 2014.
71. Gibson A. Enabling Electric Propulsion for Flight. Hybrid Electric Integrated System Testbed (HEIST) and LEAPTech. Transformative Vertical Flight Concepts Joint Workshop Highly Coupled Distributed Electric Tools, Analysis and Testing Capabilities Panel Discussion. August 27, 2014. NASA. 2014.
72. Clarke S., Lin Y., Papathakis K., Samuel A. LEAPTech HEIST Power Architecture and Testing. AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference. Dallas, Texas. June 25, 2015. NASA. 2015.
73. Moore M. On-demand Mobility Electric Propulsion Roadmap. EAA AirVenture. Oshkosh. July 22, 2015. NASA. 2015.
74. NASA Electric Research Plane Gets X Number. New Name. Press Release. June 17, 2016. NASA (www.nasa.gov/press-release/nasa-electric-research-plane-gets-x-number-new-name)
75. NASA Armstrong Fact Sheet: NASA X-57 Maxwell. Press Release. March 20, 2017. NASA (www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-109.html)
76. NASA's X-57 Electric Research Plane. Press Release. June 17, 2016. NASA (www.nasa.gov/image-feature/nasas-x-57-electric-research-plane)
77. Jean-Jacques Korsia. VITAL – European R&D Programme for Greener Aero-Engines. ISABE. 2007. 1118 p.
78. Sieber J. NEWAC Overview. MTU Aero Engines. 2009.
79. DREAM – Validation of Radical Engine Architecture Systems. 15 January, 2007. Rolls-Royce.
80. Bank R., Donnerhack S., Rae A. et al. LEMCOTEC-Ultra-High Pressure-Ratio Aero-Engines – Improving the Core-Engine Thermal Efficiency by Increasing the Overall Pressure Ratio. The 7th European Aeronautics Days. London. 20-23 October 2015.
81. Merkl E. Ultra-High Bypass Ratio Aero-Engines – Research Achievements. ENOVAL – Engine Module Validators Project Overview. The 7th European Aeronautics Days. London. 20-23 October 2015. MTU Aero Engines.
82. Silva M. E-BREAK: Engine Breakthrough Components and Subsystems. The 7th European Aeronautics Days. London. 20-23 October 2015. Turbomeca.
83. Advance and UltraFan. Rolls-Royce (https://www.rollsroyce.com/innovation/advanceandultrafan.aspx#application)
84. European Aeronautics: A Vision for 2020. Meeting Society's Needs and Winning Global Leadership. Report of the Group of Personalities. European Commission. January, 2001.
85. Flightpath 2050. Report of the Group of Personalities. European Commission. March. 2011.
86. Parker R. Large Aircraft Propulsion for the Future Evolution and Revolution. 28 July 2014. AIAA Propulsion and Energy Forum Cleveland. USA. Rolls-Royce. 2014.
87. Parker R. Vision 20 and beyond. Rolls-Royce. 2015.

88. Rolls-Royce Details Advance and UltraFan Test Plan. Aviation Week & Space Technology. August 28, 2014 (http://aviationweek.com/print/commercialaviation/rollsroycedetailsadvanceandultrafantestplan)
89. Whurr J. Future Civil Aero engine Architectures & Technologies. Rolls-Royce, 2013.
90. Thomas M. Better Power for a Changing World. Next Generation Engines. 2014.
91. Rolls-Royce Plans for New Single-Aisle, Twin-Aisle Airplane Engines. leehamnews.com. 10 March, 2014 (http://leehamnews.com/2014/03/10/rolls-royce-plans-for-new-single-aisle-twin-aisle-airplane-engines/)
92. Rolls-Royce Builds Next-Gen Advance Demo Engine. EnviroTREC. May 27, 2016 (http://www.envirotrec.ca/2016/05/27/rollsroycebuildsnextgenadvancedemoengine/)
93. Rolls-Royce Prepares First 'Advance' Engine Core for Testing. AINonline. April 6, 2017 (http://www.ainonline.com/aviationnews/airtransport/20170406/rollsroycepreparesfirstadvanceenginecoretesting)
94. Way G. (on behalf of Geer A.). Clean Sky 2 – Next Stages in Bringing VHBR Technology to Life: UltraFan®-VHBR Engine – Advance3 Engine. The 8th European Tandem Aeronautics Days. Bucharest. 27–30 May 2019. Rolls-Royce.
95. Open Rotor. Istres. 03.10.2017. Press update. October 3, 2017. Safran.
96. Peacock N. Engine ITD Key Deliverables. Clean Sky Take-Off. 5 February 2008, European Commission.
97. Ron van Manen. The Clean Sky 2 Programme. The 7th Europ. Aeronautics Days. London. 20–23 Oct. 2015. Clean Sky JU.
98. Lebreton Th., Way G., Ebenhoch G. A Technology Roadmap for Future Aircraft Propulsion Systems. The 8th European Tandem Aeronautics Days. Bucharest. 27–30 May 2019.
99. Seitz A., Schmitz O., Isikveren A.T., Hornung M. Electrically Powered Propulsion: Comparison and Contrast to Gas Turbines. Deutscher Luft und Raumfahrtkongress. 2012. Bauhaus Luftfahrt e.V.
100. 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.
101. Grönstedt T. Ultra Low Emission Technology Innovations for Mid-century Aircraft Turbine Engines. The 8th European Tandem Aeronautics Days. Bucharest. 27–30 May 2019. Chalmers University of Technology.
102. Kaiser S., Kellermann H., Nickl M., Seitz A. A Composite Cycle Engine Concept for Year 2050. ICAS 2018-0638.
103. ASuMED. Advanced Superconducting Motor Experimental Demonstrator. ID: 723119. European Commission.
104. MAHEPA. Modular Approach to Hybrid Electric Propulsion Architecture. ID: 723368. European Commission.
105. H3PS. High Power High Scalability Aircraft Hybrid Powertrain. ID: 769392. European Commission.
106. CENTERLINE. Concept Validation Study For Fuselage Wake-Filling Propulsion. ID: 723242. European Commission.
107. Eremenko P. Building the Third Golden Age of Aerospace. Airbus Media Day. 09 June 2017. Airbus.
108. Airbus Group and Siemens Sign Long-Term Cooperation Agreement in the Field of Hybrid Electric Propulsion Systems. Press Release. 7 April 2016. Airbus Group& Siemens AG.
109. Airbus отказывается от E-Fan в пользу мощного электрического самолета. Апрель 2017 (https://hightech.fm/2017/04/03/efanx)
Airbus otkazyvaetsia ot E-Fan v pol'zu moshchnogo elektricheskogo samoleta [Airbus Gives Up E-Fan in Favor of Powerful Electric Aircraft]. 2017. (https://hightech.fm/ 2017/04/03/efanx)
110. Hybrid-Electric Airbus E-Fan 1.2 to Debut at Oshkosh. July 21, 2016 (http://www.flyingmag.com/hybrid-electric-airbus-e-fan-12-to-debut-at-oshkosh)
111. CityAirbus Demonstrator Passes Major Propulsion Testing Milestone. Press Release. 3 October 2017. Airbus Helicopters.
112. Future of Electric Flight. 18 June 2017 (http://www.airbus.com/newsroom/topics-in-focus/electrification.html)
113. FACTSHEET. Rekord-motor SP260D und Extra 330LE. Press. 4 Juli 2016. Siemens AG.
114. Rolls-Royce Accelerates Electrification Strategy with Acquisition of Siemens' Electric and Hybrid-Electric Aerospace Propulsion Business. Press Release. 18 June 2019.Rolls-Royce.
115. VoltAero Cassio Set To Make First Hybrid Flight. Paris Air Show. News. June 19, 2019 (https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2019-06-19/voltaero-cassio-set-make-first-hybrid-flight)
116. All-electric Jet Firm Eviation Announces US Regional Airline as First Customer, Predicts Delivery in 2022. Paris Air Show. News. June 18, 2019 (https://www.cnbc.com/2019/06/18/all-electric-jet-firm-eviation-announces-us-airline-as-first-customer.html)

Материалы получены редакцией 01.08.2019