

Программы США по разработке принципиально новых технологий для двигателей шестого поколения военной авиации (обзор)

Солонин В.И., Палкин В.А.

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

Рассмотрено содержание и реализация научно-исследовательских и экспериментальных работ в рамках государственных программ США, направленных на разработку принципиально новых технологий для двигателей шестого поколения военной авиации. Приоритетным направлением является разработка унифицированного адаптивного трехконтурного двигателя, создание которого в середине 2020-х гг. кардинально улучшит боевые возможности самолета F-35 и обеспечит потенциал для создания самолетов с принципиально новыми характеристиками. Большое внимание уделяется также направлению гиперзвуковых летательных аппаратов с комбинированными силовыми установками, создание которых предполагается к 2040 г.

Ключевые слова: адаптивный двигатель, трехконтурный двигатель, унификация, комбинированная силовая установка, гиперзвук, перспективные технологии, военная авиация.

U.S. programs for development of fundamentally new technologies for sixth generation military aircraft engines (review)

Solonin V.I., Palkin V.A.

CIAM, Moscow

The article explores content and implementation of research and experimental work in the framework of US government programs aimed at developing fundamentally new technologies for engines of the sixth generation of military aircraft. The priority field is the development of a unified adaptive three-stream engine, creation of which in mid-2020's will dramatically improve combat capabilities of F-35 aircraft and provide a potential for creating aircraft with fundamentally new characteristics. Much attention is also paid to the field of hypersonic aircraft with combined power plants, creation of which is expected by 2040.

Keywords: adaptive engine, three-stream engine, unification, combined power plant, hypersonic, advanced technologies, military aircraft.

Введение

Разработка новых технологий в авиадвигателестроении занимает не менее 10...16 лет, поэтому за рубежом с конца 1990-х гг. активно ведутся работы по созданию научно-технического задела (НТЗ) для двигателей 2025...2030 гг. (шестого поколения). Программы работ по созданию НТЗ для двигателей военного и гражданского назначения взаимно дополняют друг друга (поскольку на 70...80% используют общие техно-

логии) и выполняются при активном управлении и финансовой поддержке со стороны государства.

Мировым лидером в разработке новых технологий для силовых установок летательных аппаратов (ЛА) различного назначения являются США. Методология организации научных исследований и разработок по программам в США изложена в работе [1]. С помощью программ разработки перспективных технологий, материалов, узлов и систем государство осуществляет управление технологическим развитием авиационного

двигателестроения. Ежегодное бюджетное финансирование научно-исследовательских и экспериментальных работ в области авиационного двигателестроения составляет более 400 млн долл. Кроме того, ведущие авиадвигателестроительные компании на проведение НИОКР в обеспечение создания НТЗ затрачивают 5...15% выручки (несколько миллиардов долларов в год).

Цели и задачи научно-исследовательских и экспериментальных работ по военным двигателям определяет Министерство обороны США (МО США). Основные из них – постоянное совершенствование тактико-технических характеристик двигателей, снижение затрат на обслуживание, улучшение показателей заметности, живучести и значительное повышение топливной экономичности для увеличения дальности полета и длительности барражирования. Кроме того, к будущим силовым установкам предъявляются требования по питанию бортового оружия направленной энергии и обеспечению противодействия такому оружию. Для этих целей требуется разработка технологий комплексного управления тепловым состоянием и мощностью, а также системы большой энергопроизводительности.

С 2007 г. все направления исследований и разработок, проводимых в США за счет бюджетных средств, определяются нормативно-техническими документами: «Национальным планом по научным исследованиям и разработкам в области авиации и развитию соответствующей инфраструктуры США» и техническим приложением к национальному плану, подготовленным Национальным советом по науке и технологиям при Администрации президента США (NSNC) в 2006...2008 гг. в соответствии с указом президента [2].

В обеспечение необходимого уровня знаний в процессе выполнения программ с середины 1990-х гг. используется разработанная NASA методология уровня готовности новых технологий [3].

Отметим также, что зарубежные авиадвигателестроительные компании уже несколько десятилетий назад перешли на новую методологию создания двигателей, обеспечивающую значительное снижение сроков и стоимости разработки, суть которой состоит в том, что решение о начале опытно-конструкторских работ принимается только тогда, когда компанией накоплен необходимый уровень знаний и проверенных конструкторских решений, обеспечивающих выполнение поставленной задачи в заданные сроки.

Программа ИНРТЕТ

Основой создания прорывных технологий XXI века в США явилась программа ИНРТЕТ (Integrated High Performance Turbine Engine Technology, 1987...2006 гг.) – национальная приоритетная программа, ставящая целью обеспечить почти двукратное улучшение показателей качества перспективных авиационных двигателей. Хотя программа проводилась по инициативе и под контролем МО США и была направлена, прежде всего, на совершенствование двигателей военной авиации, результаты ее работы внедряются во все области промышленности, где используются газотурбинные двигатели. Работы по программе охватывали три типа двигателей [4, 5]: ТРД(Ф) и ТРДД(Ф) большой размерности; ТВД и ТВГТД; малоразмерные и коротко-ресурсные ТРД и ТРДД.

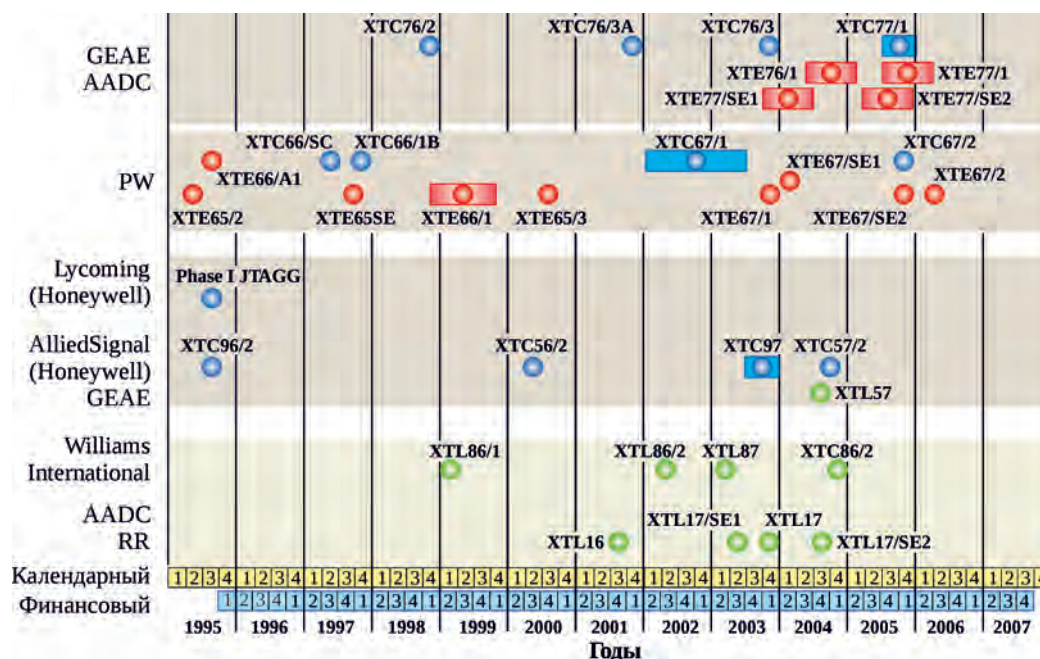


Рис. 1. Демонстрационные газогенераторы и двигатели, испытанные в ходе проведения работ по программе ИНРТЕТ

Проверка и отработка разработанных технологий была проведена на демонстрационных газогенераторах и двигателях. Так, в рамках работы над двигателями большой размерности было создано более 20 демонстрационных газогенераторов и двигателей (рис. 1), на которых отработывались прорывные технологии и технические решения: высоконагруженные лопаточные ступени; широкое применение композиционных материалов, в том числе на основе керамической матрицы; лопатки турбины с системой охлаждения Supercooling, обеспечивающие околостехиометрическую температуру газов на входе в турбину; гибридные и магнитные подшипники; щеточные уплотнения; блиски с полыми лопатками; системы «электрического» двигателя, а также узлы и системы двигателей изменяемого рабочего процесса.

Разработанные по программе ИНРТЕТ технологии позволяют создать (в сравнении с двигателями четвертого поколения):

- ТРДДФ традиционной схемы с бóльшим на 40...50% отношением тяги к массе и меньшим на 20% удельным расходом топлива на форсажном режиме;

- ТВГТД (ТВД) с бóльшим на 100...120% отношением мощности к массе и меньшим на 30% удельным расходом топлива;

- малоразмерные короткоресурсные ТРД и ТРДД с бóльшим на 80...100% отношением тяги к массе и меньшим на 40% удельным расходом топлива.

Технологии, отработанные в программе ИНРТЕТ, были использованы при создании ТРДДФ F119 и F135 и модернизации двигателей F110, F414 и F136 [1], а также при создании и модернизации двигателей гражданского назначения.

На программу предполагалось затратить 4,5 млрд долл. при среднем годовом финансировании 200 млн долл. [6].

Программа VAATE

Не дожидаясь завершения программы ИНРТЕТ, в 2003 г. МО США с участием ведущих производителей авиационных двигателей приступило к выполнению следующей, еще более амбициозной программы – VAATE (Versatile Affordable Advanced Turbine Engines), чтобы обеспечить вооруженным силам США глобальное превосходство до середины XXI века, предоставив боевую технику по доступной цене. В отличие от программы ИНРТЕТ, в которой основные усилия были направлены на улучшение технических характеристик ГТД (узловые технологии), в программе VAATE основной целью является улучшение стоимостных показателей (бóльшая доступность) двигателя, которые определяются



Рис. 2. Проекты программы VAATE

в основном стоимостью разработки и производства. В связи с этим основной задачей стало определение конфигурации и отработка технологий создания унифицированных газогенераторов, на основе которых могут быть созданы двигатели для ЛА различного назначения. В рамках программы VAATE разрабатывались (дорабатывались) не отдельные технологии, а комплексные интегрированные технологии для всей силовой установки. При этом были не только разработаны конструктивные облики двигателей различного назначения, но и созданы демонстрационные двигатели, подтверждающие эффективность разработанных технологий [5, 7].

Финансирование работ по программе осуществляется так же, как в программе ИНРТЕТ, за счет бюджетных средств и средств участников работ.

Программа VAATE состоит из ряда проектов (рис. 2), включающих разработку технологий и демонстрационных двигателей для многорежимных ЛА с числом $M > 4$ (HiSTED), компактного эффективного подъемного двигателя (CEDLE), турбовальных двигателей в классе мощности $N_e = 700$ и 3000 л.с. (SHFE и AATE), компрессорных технологий для силовых установок дозвуковых ЛА с высокими значениями степени повышения давления и температуры воздуха (HEETE) [1].

Проект ADVENT

Особое место в программе VAATE занимает проект ADVENT (Adaptive Versatile Engine Technology) – разработка унифицированного адаптивного двигателя, обеспечивающего высокую топливную эффективность и высокий уровень характеристик в широком диапазоне высоты и скорости полета. По мнению специалистов ВВС США, создание адаптивного двигателя (двигателя изменяемого рабочего процесса) будет означать большой шаг вперед, так как позволит разработать унифицированный двигатель для боевых самолетов различного назначения. Основным требованием является обеспечение высокой удельной тяги на максимальных режимах работы (для бесфорсажного крейсерского

сверхзвукового полета и при максимальных скоростях на форсажных режимах работы) и низкого удельного расхода топлива для полета на дозвуковых крейсерских режимах.

Целью проекта ADVENT является разработка и проверка перспективных технологий силовой установки (воздухозаборник, широко регулируемый двигатель, реактивные сопла и интегрированная система теплового регулирования), которые обеспечат оптимизацию работы силовой установки в широком диапазоне высоты и скорости полета.

При разработке и создании демонстрационного адаптивного двигателя отработаны следующие технологии [8]:

- высокотемпературные ($T_{г\max}^* = 2100...2200$ К) турбины с регулируемым сопловыми аппаратами, обеспечивающие высокую эффективность в широком диапазоне изменения расхода газа и мощности;
- высокоэффективные вентиляторы с переменной степенью повышения давления;
- высоконагруженные компрессоры с температурой на выходе до 1030 К, обеспечивающие широкий диапазон изменения расхода воздуха и степени повышения давления;
- механические системы, обеспечивающие изменение в широком диапазоне степени двухконтурности и отбора воздуха на увеличение подъемной силы;
- оптимальная выработка и распределение энергии, охлаждение конструкции как двигателя, так и ЛА;
- электрические приводы систем двигателя и ЛА;
- интеллектуальная система автоматического управления, адаптирующаяся к внешним условиям и техническому состоянию;
- широкое применение композиционных материалов;
- улучшение интеграции воздухозаборника и сопла.

Научно-исследовательская лаборатория AFRL (НИЛ) ВВС США рассматривает разработку демонстрационных адаптивных трехконтурных двигателей как отработку прорывных технологий для создания базового двигателя нового поколения, на основе которого будут создаваться силовые установки для ЛА различного назначения.

К адаптивному универсальному двигателю для тактической и стратегической авиации, ввод которого в эксплуатацию ожидается не ранее 2025...2030 гг., НИЛ ВВС США предъявляет следующие требования: повышение топливной эффективности ЛА на 35% за счет существенного снижения расхода топлива на различных режимах полета, высокая эффективность в различных условиях полета, широкое применение электрических и других прорывных технологий, а также снижение стоимости всех составляющих жизненного цикла.

Поставленным требованиям, по мнению специалистов НИЛ ВВС США, отвечает интеллектуальный адаптивный двигатель с высоким уровнем параметров ($\pi_{к\sum}^* = 40...70$, $T_g^* = 2200...2400$ К), интегрированный с ЛА. Применение такого двигателя в составе силовой установки позволит создать многоцелевые самолеты с большой дальностью полета, обладающие оптимальными характеристиками в различных условиях полета.

Разнообразие боевых задач, поставленных перед авиацией следующего поколения, требует разработки унифицированного двигателя, который может адаптироваться к различным условиям боевого применения, что позволит сократить типаж, а значит и стоимость разработки и производства перспективных двигателей.

При формировании требований к унифицированному адаптивному двигателю рассматривались концепции различных боевых самолетов-истребителей,

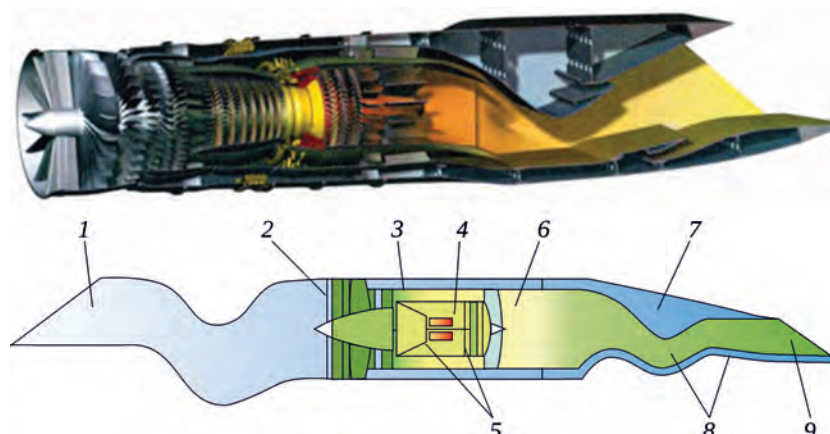


Рис. 3. Адаптивный двигатель:

1 – воздухозаборник; 2 – постоянный расход при изменяемой степени повышения давления; 3 – регулируемый перепуск вспомогательного воздуха; 4 – регулируемое течение охлаждающего воздуха; 5 – изменяемая площадь проходных сечений компрессора и турбины; 6 – изменяемая площадь канала смещения; 7 – интенсивное воздушное охлаждение горячей части двигательной установки и планера; 8 – регулируемые сопла управления газогенератором и перепуском; 9 – выхлопное сопло

дозвуковых и сверхзвуковых ударных самолетов. Так, для истребителя завоевания превосходства в воздухе наряду с высокой маневренностью и малой заметностью, ключевой особенностью является увеличенный радиус действия, который позволит сопровождать новый бомбардировщик В-21 при выполнении задач проникновения в глубокий тыл потенциального противника. Для ударных самолетов различного назначения должны быть обеспечены: большой радиус действия (1800...11 000 км); возможность преодоления глубокоэшелонированной зоны ПВО (450...900 км); возможность короткого взлета ($L_{вПП} = 1200...1800$ м, что примерно в два раза меньше стандарта НАТО $L_{вПП} = 2440$ м) при высоких температурах окружающего воздуха (до $+35^\circ\text{C}$) [8, 9].

Концептуальное исследование, проведенное самолето- и двигателестроительными компаниями, показало, что этим требованиям может удовлетворить адаптивный трехконтурный двигатель (рис. 3).

Расчетные исследования по оптимизации конструктивной схемы и законов управления адаптивным трехконтурным двигателем, интегрированным с ЛА, показали, что при применении на многорежимных ударных самолетах с большим радиусом действия такой двигатель имеет существенные преимущества перед двигателями традиционной двухконтурной схемы. Эти преимущества обеспечиваются широким регулированием узлов с целью изменения степени двухконтурности в большом диапазоне при сохранении высокой температуры газа перед турбиной, что позволит снизить удельный расход топлива в области дозвуковых скоростей полета на 34% по сравнению с ТРДДФ пятого поколения (рис. 4). Кроме того, третий контур позволяет обеспечить оптимальное тепловое регулирование интегрированной системы охлаждения силовой установки и самолета, низкий уровень заметности, отбор воздуха на улучшение аэродинамических характеристик самолета и, при разумном регулировании, поддержание

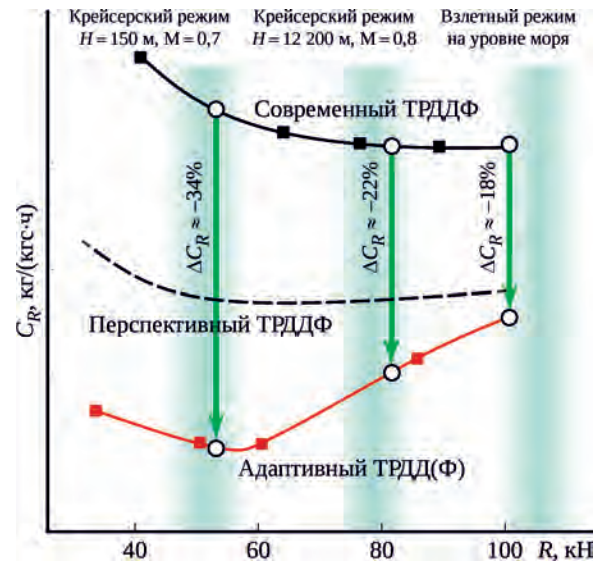


Рис. 4. Предварительная оценка экономии топлива адаптивным двигателем

жания постоянного расхода воздуха на входе в двигатель при его дросселировании с целью снижения лобового сопротивления воздухозаборника и сопла.

Однако реализация этих преимуществ потребует усложнения конструктивной схемы двигательной установки и отработки новых технологий.

Разработка адаптивного трехконтурного двигателя по заказу НИЛ ВВС США началась в 2007 г. и проводится по четко скоординированным программам (рис. 5). В рамках стартовой программы ADVENT разрабатывалась схема адаптивного двигателя, применение которого в составе силовой установки должно обеспечить увеличение дальности и продолжительности полета по сравнению с двигателями традиционной схемы пятого и шестого поколений на 30 и 70% для дозвукового ударного самолета и на 40 и 80% для сверхзвукового самолета [1].

Адаптивная схема позволяет согласовать режимы работы воздухозаборника, двигателя и сопла путем

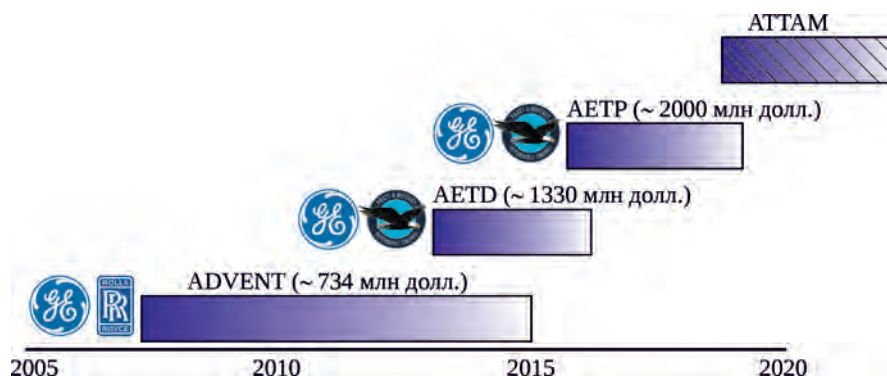


Рис. 5. Программы разработки адаптивного трехконтурного двигателя:

ADVENT – разработка схемы адаптивного двигателя; AETD – демонстрация адаптивных двигательных технологий; AETP – создание образцов адаптивных двигателей; АТТАМ – интеграция адаптивных двигателей с энергосистемами боевых самолетов

изменения режимов работы вентилятора и газогенератора, что, в свою очередь, обеспечивает уменьшение сопротивления самолета. Так, например, для ударного самолета, рассчитанного на максимальную скорость полета $M_n = 2,5$, уменьшение сопротивления составляет 10...15% при дозвуковых, 26% при трансзвуковых и 6% при сверхзвуковых скоростях полета [9].

Основным разработчиком программы ADVENT была выбрана компания General Electric, являющаяся безусловным лидером в создании двигателя изменяемого рабочего процесса (VCE). С конца 1970-х гг. компания разрабатывала по программе NASA двигатели сверхзвуковых пассажирских самолетов (СПС) с адаптивным вентилятором, разделенным на два каскада с двойным перепуском [10]. В рамках программы были созданы демонстраторы, на которых отработаны: адаптивный вентилятор с двойным перепуском, клапаны регулирования расхода воздуха через вентилятор и смеситель, турбина низкого давления с регулируемым сопловым аппаратом. Результаты успешных испытаний двигателя-демонстратора YJ101 были использованы при разработке двигателя GE21 для СПС с крейсерской скоростью $M_n = 2,4$.

Программа NASA по разработке двигателей-демонстраторов для СПС была интегрирована с военными программами по адаптивным двигателям. Компания General Electric продолжила работы по этим двигателям в программе ATF (Advanced Tactical Fighter), посвященной двигателям для истребителей пятого поколения, создав демонстрационный двигатель YF120 (прототип двигателя F120 – участника конкурса на силовую установку самолета F-15) и двигатель F136 (как альтернативу двигателю F135 для самолета F-35).

Следует отметить еще один фактор, который повлиял на выбор компании General Electric в качестве основного разработчика программы ADVENT, – уникальный опыт компании по разработке общего газогенератора для двигателей различного назначения, применяемых как на дозвуковых, так и на сверхзвуковых самолетах (двигатели F101, F110, F118 и семейства гражданских двигателей CFM56) [1].

Исходя из вышеуказанных соображений на начальном этапе программы ADVENT для разработки схем универсального базового адаптивного двигателя для ЛА различного назначения в качестве основных исполнителей были выбраны компания General Electric и отделение компании Rolls-Royce – Liberty Works.

Бюджетное финансирование программы ADVENT на 2007...2013 гг. составило 524 млн долл. На этом этапе нужно было не только определиться со схемой адаптивного двигателя и отработать технологии, но и провести критический анализ проекта двигателя, для чего каждой компании дополнительно выделили по 105 млн долл.



Рис. 6. Силовая установка с адаптивным двигателем для бомбардировщика следующего поколения

Целью программы ADVENT являлась разработка схем адаптивного двигателя тягой $R_0 \approx 89$ кН и демонстрация технологий для дозвукового двигателя, который мог бы найти применение на предложенном ВВС США бомбардировщике следующего поколения (рис. 6) [6].

При проектировании двигателя компания General Electric использовала технологии, разработанные по программе HEETE (Highly Efficient Embedded Turbine Engine) и при создании двигателя LEAP. В ходе работ по программе ADVENT были использованы технологии, обеспечивающие самые высокие в истории авиации температуры, достигнутые одновременно в компрессоре и турбине. В связи с этим в ТВД использованы лопатки соплового аппарата из керамического композиционного материала [6].

Проект AETD

С целью развития работ по адаптивному трехконтурному двигателю в 2013 году НИЛ ВВС США выбрала компании General Electric и Pratt & Whitney для участия в программе AETD (Adaptive Engine Technology Development), посвященной разработке технологий для создания адаптивного двигателя, и заключила с ними контракт на продолжение программы ADVENT. Финансирование программы AETD составило 680 млн долл., плюс 325 млн долл. каждой компании на создание и испытания адаптивного вентилятора и газогенератора.

Цель программы AETD – доведение технологий программы ADVENT до уровня готовности, позволяющего приступить к разработке адаптивного двигателя

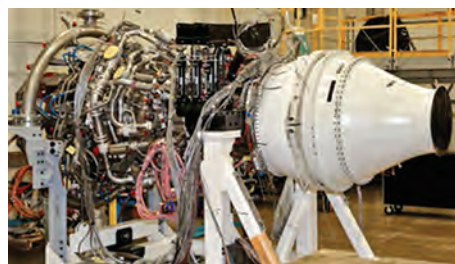


Рис. 7. Разработанный по программе AETD демонстрационный газогенератор на испытательном стенде A1 компании General Electric [11]

(УГТ 5...6). Программа АЕТД использовала технологии для дозвуковых двигателей, продемонстрированные в программе ADVENT, в обеспечение создания двигателя для сверхзвуковых многоцелевых самолетов, сохранив исходные требования – получение высокой взлетной тяги и низкого расхода топлива на крейсерских режимах.

По программе АЕТД компания General Electric провела оценку компонентов и данных, собранных после трех серий стендовых испытаний компрессора, газогенератора и модуля адаптивного вентилятора.

В результате испытаний компрессора и газогенератора (рис. 7) компания General Electric добилась ожидаемых характеристик сжатия и нагрузки ступеней. С точки зрения работоспособности конструкция сможет обеспечить требуемый запас газодинамической устойчивости и другие характеристики. Кроме того, специалисты компании продолжали совершенствовать базовые технологии, а также принимать решения по внедрению новых материалов [11]. В рамках программы были также проведены испытания двух новых секторов камеры сгорания, третьего (холодного) контура, перспективного теплообменника, форсажной камеры, подшипников и механических систем.

Компания Pratt & Whitney в рамках программы АЕТД завершила испытания адаптивного трехконтурного вентилятора в сочетании с турбокомпрессором двигателя F135. Согласно данным [11], вентилятор Pratt & Whitney удовлетворил и даже превзошел ожидания в отношении заявленных характеристик и механической совместимости модуля вентилятора с узлами ТРДД.

В адаптивный двигатель Pratt & Whitney внедряет перспективные технологии, которые считает ключевыми для удовлетворения требований к боевым самолетам по продолжительности полета на высоких скоростях, включая адаптивные системы управления и усовершенствованные САУ с интегрированным управлением тягой и тепловым режимом.

Проект АЕТР

О новых контрактах на сумму 2 млрд долл., выделенную на разработку двигателей-демонстраторов по программе АЕТР (Adaptive Engine Transition Program) и поделенную между General Electric и Pratt & Whitney, было объявлено в июне 2016 г. Чтобы подчеркнуть важность этого шага в создании нового поколения двигателей, ВВС США нарушили традицию, обозначив два демонстратора АЕТР как ХА, используя букву «А» (adaptability) вместо «F», как было ранее (F135/F136). Двигатель ХА100 разрабатывается компанией General Electric, ХА101 – компанией Pratt & Whitney. Новые

обозначения опытных двигателей возвещают об эре адаптивных технологий для будущих истребителей ВВС США, о приближении к реализации и появлении совершенно новой архитектуры и новой линейки двигателей.

В основу разработки демонстрационных двигателей ХА100 положена схема трехконтурного ТРДДФ, запатентованная фирмой General Electric в 2006 г. Конструктивный облик газотурбинной части и выходного устройства (включающего регулируемый смеситель трех потоков и реактивное сопло) адаптивного трехконтурного двигателя показаны на рис. 8.

Оба проекта, ХА100 и ХА101 (рис. 9), предусматривают изменение степени двухконтурности и степени повышения давления в вентиляторе в широких диапазонах.

Критический анализ проекта ХА100 должен был завершиться в конце 2017 г. с последующим выпуском

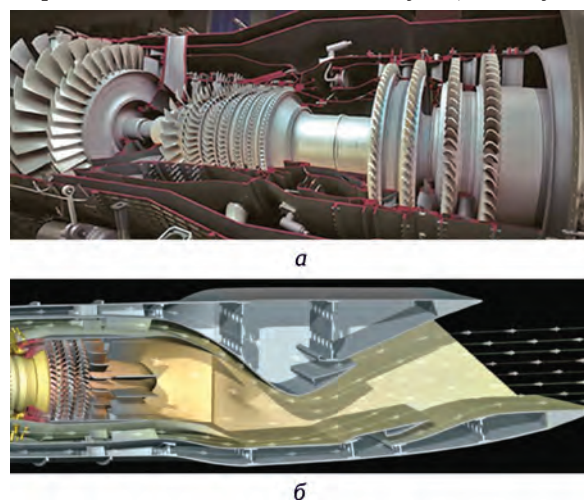


Рис. 8. Конструктивный облик адаптивного трехконтурного двигателя:
а – газотурбинная часть; б – выходное устройство



Рис. 9. Демонстрационные адаптивные трехконтурные двигатели компаний General Electric (а) и Pratt & Whitney (б)

чертежей для создания натурального двигателя. Известно, что компания General Electric уже приступила к выбору цепочки поставщиков необходимого оборудования и технического обеспечения. Предполагалось, что начиная с 2019 г. компания изготовит три экспериментальных двигателя и проведет их наземные испытания в 2019...2020 гг. По результатам испытаний первого двигателя будет оценена базовая конструкция, испытания второго двигателя позволят оценить эффективность и работоспособность, испытания третьего – срок службы.

Сведений о конструктивном облике и плане разработки двигателя ХА101 еще меньше. Известно, что создание и проведение испытаний демонстрационных двигателей должно быть завершено в 2020 г. [12].

Проект АТТАМ

Одновременно с работами по адаптивному двигателю МО США совместно с двигателе- и самолетостроительными компаниями заканчивает формирование нового многолетнего зонтичного проекта АТТАМ (Advanced Turbine Technology for Affordable Mission Capability). Программа АТТАМ рассматривается как продолжение программы VAATE и будет направлена на разработку технологий, позволяющих не только существенно улучшить характеристики адаптивного двигателя, но и интегрировать в нем такие технологии, как генерация электроэнергии и терморегулирование, для обеспечения работы нового радиоэлектронного оборудования и систем вооружения, включая лазерное. В программе АТТАМ будет уделено большое внимание снижению заметности для инфракрасных систем обнаружения.

В связи с этим компания General Electric открыла в г. Эвендейл (штат Огайо, США) исследовательский центр VESIL, который займется разработкой методов и систем охлаждения для снижения температуры боевых самолетов.

В настоящее время разработка технологий по совершенствованию теплового состояния и управления энергопотреблением боевых самолетов осуществляется в рамках национального плана США Energy Optimized Aircraft (энергооптимизированный самолет). Основу этого плана составляет программа НИЛ ВВС США INVENT (Integrated Vehicle Energy Technology), посвященная разработке адаптивных интеллектуальных самолетных энергосистем.

Развитием программы INVENT, завершившейся в 2017 г., является программа Megawatt Aircraft (мегаваттный самолет), нацеленная на испытание технологий управления электрическими нагрузками в несколько мегаватт, применение которых ожидается на будущих боевых самолетах.

В связи с большим объемом инноваций, необходимых для достижения поставленных целей, программа АТТАМ будет взаимосвязана с проектами НИЛ ВВС США по самолетам, включая Energy Optimized Aircraft и Megawatt Tactical Aircraft Initiative (тактический самолет с лазерной установкой мегаваттного класса). Однако основная цель программы АТТАМ – интеграция силовой установки самолета и его бортовых систем.

Разработка гиперзвуковых технологий

Кроме программ по созданию НТЗ, обеспечивающих разработку прорывных технологий и технических решений для двигателей военной авиации различного назначения с числом $M_{\max} \leq 2,5 \dots 3,0$, в США активно ведется работа по созданию систем вооружения с гиперзвуковыми скоростями преодоления противоракетной обороны потенциального противника для выполнения широкого комплекса боевых задач. Работы по данному направлению проводятся в соответствии с нормативными документами по различным программам, финансирование которых осуществляется по линии МО США и NASA с привлечением промышленности (рис. 10).

С целью разработки гиперзвуковых технологий МО США и NASA сформировали и утвердили в 2001 г. Национальную стратегию в области гиперзвука (National Hypersonics Strategy), а в 2008 г. МО США дополнительно разработало Концепцию быстрого глобального удара (Prompt Global Strike, PGS) [13, 14].

Концепцией PGS предусматривается разработка систем, позволяющих нанести высокоточный неядерный удар по любой точке земного шара в течение 1 часа, в том числе создание как стратегического гиперзвукового вооружения, так и гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) различного назначения. К прообразам такого вооружения можно отнести демонстрационные ГЛА: Х-43А на водородном топливе ($M_n = 9,68$) и Х-51А на углеводородном топливе ($M_n = 5,1$). Разгон этих ГЛА осуществлялся ракетой, а в качестве двигателя в их силовых установках применялся ГПВРД.

К 2030 г. предполагается разработать технологии, позволяющие создать комплексы воздушного запуска ГЛА, а к 2040 г. создать ЛА с комбинированной силовой установкой (КСУ), в том числе и многоразовые космические транспортные системы (МКТС).

Для отработки гиперзвуковых технологий МО США и NASA располагают стендами, позволяющими проводить испытания экспериментальных объектов при скоростях, соответствующих $M_{\max} = 8$.

Основной целью практически всех программ США по разработке гиперзвуковых технологий является их военное применение в рамках концепции PGS. Поэтому финансирование большинства из них осуществ-

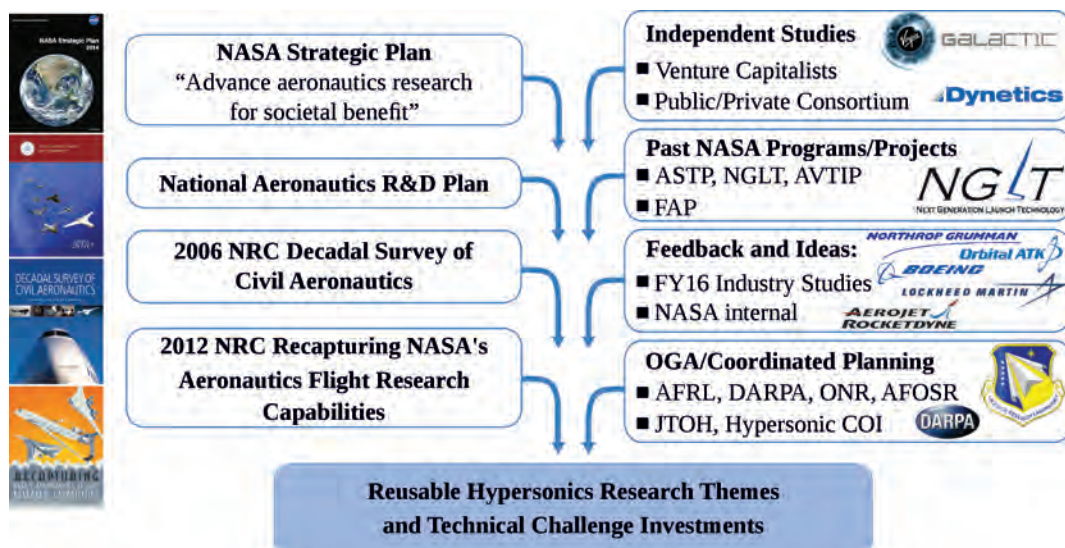


Рис. 10. Нормативные документы, программы и участники работ по разработке гиперзвуковых технологий

вляется по линии МО США. В этих работах принимает участие NASA, однако его исследования нацелены на создание КСУ для МКТС.

Со стороны МО США координацию НИОКР по созданию гиперзвуковых систем осуществляет Объединенное управление по гиперзвуковым технологиям (JTOH). Оно обеспечивает формирование программ НИОКР, их коррекцию каждые два года, согласование программ МО США и NASA, ежегодную оценку состояния работ и оценку адекватности их финансового обеспечения, взаимодействие МО США с исполнительными и законодательными органами государственной власти.

Основным разработчиком в области гиперзвуковых технологий в настоящее время является компания Lockheed Martin, которая активно проводит работы по созданию гиперзвукового самолета-разведчика типа SR-71. Компания разрабатывает перспективный БПЛА SR-72 с КСУ (рис. 11): ГТД будет разгонять БПЛА до числа $M_n = 3$, а ГПВРД – до числа $M_n = 5,5 \dots 6$. Летные испытания демонстратора БПЛА должны начаться в 2020 г. Демонстратор размерности F-22 будет оснащен натурной КСУ [15, 16].

В октябре 2017 г. Управление перспективных исследовательских проектов МО США (DARPA) в рамках программы AFRE (Advanced Full Range Engine) заключило контракт с компанией Aerojet Rocketdyne на разработку и демонстрацию КСУ для многорежимного высокоскоростного самолета с числом $M_n = 5$. Программа предполагает использовать в КСУ готовый ТРДДФ, способный обеспечить число $M_n = 3 \dots 4$ (F405 компании Rolls-Royce, оснащенный форсажной камерой), и двухрежимный ГПВРД SXJ61.

В рамках программы планируется решить следующие проблемы:

- тепловое регулирование во всей области полета;
- интегрированное управление КСУ на переходных режимах;
- согласование расхода воздуха через контуры;
- достижение стабильности горения в двухрежимном ГПВРД;
- повторный запуск ГТД при высокой скорости;
- масштабирование конструкции КСУ для полноразмерного ГЛА.

В соответствии с программой исследований крупномасштабные компоненты КСУ сначала будут испытаны

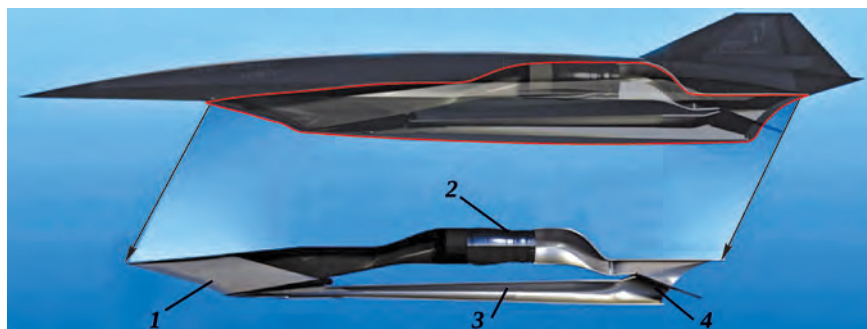


Рис. 11. Схема комбинированной силовой установки SR-72:
1 – общий воздухозаборник; 2 – ГТД; 3 – двухрежимный ГПВРД; 4 – общее сопло

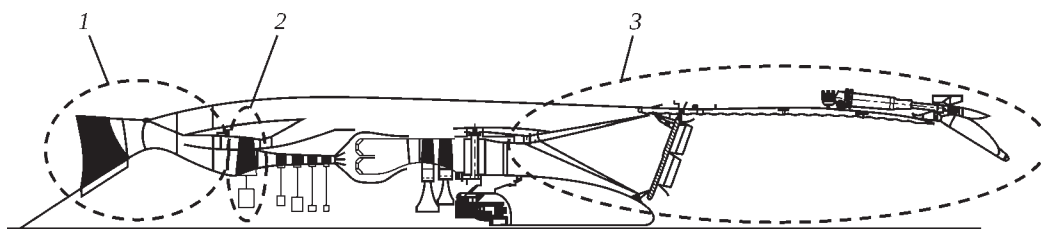


Рис. 12. Схема демонстрационного ТПД RTA-1:

1 – первый каскад вентилятора; 2 – второй каскад вентилятора (CDFS); 3 – ФПК и сопло

отдельно друг от друга, затем будут проведены испытания натурной КСУ на переходных режимах на наземном стенде в свободной струе. Достижение этих целей позволит применять КСУ в будущих гиперзвуковых системах: дальнем штурмовике, высотном разведчике, двухступенчатой МКТС и т.п.

Концептуальное проектирование ГЛА, завершенное в 2017 финансовом году, позволило определить требования к характеристикам демонстрационного двигателя при проведении стендовых испытаний. Планы на 2018 финансовый год включали начало испытаний крупномасштабного общего воздухозаборника и натурной камеры сгорания двухрежимного ГПВРД, завершение изготовления натурного общего сопла и начало интеграции в КСУ готового ГТД.

Опираясь на десятилетний опыт проектирования и создания различных высокоскоростных ЛА, компания Boeing также участвует в гонке за лидерство в области гиперзвуковых технологий, выступая в качестве потенциального разработчика будущего ударно-разведывательного самолета с числом $M_n = 5 \dots 6$. Партнером Boeing по двигателям является компания Orbital ATK, получившая в сентябре 2017 г. контракт стоимостью 21,4 млн долл. в рамках программы AFRE.

NASA, наряду с МО США, на протяжении многих лет в рамках государственных программ проводит исследования различных концепций гиперзвуковых, в том числе турбопрямоточных, двигателей для ЛА с числом $M_n = 4 \dots 6$. Так, в рамках программы ASTP (Advanced Space Transportation Program) по проекту RTA (Revolutionary Turbine Accelerator) проводились работы по двум направлениям: разработка демонстрационных турбопрямоточных двигателей (ТПД) для проведения стендовых испытаний и разработка КСУ на основе ГТД для проведения летных испытаний.

Для изучения проблем, связанных с работоспособностью ТПД в широком диапазоне чисел M_n , компания General Electric предложила использовать существующий ТРДДФ F120 для проектирования и разработки демонстрационного двигателя RTA-1 (рис. 12). Этот адаптивный двигатель разрабатывался с учетом обеспечения требуемых тяговых характеристик на газотурбинном режиме до числа $M_n = 3$ и перехода на прямоточный режим работы в диапазоне $M_n = 3 \dots 4$ путем

перевода на режим полетного малого газа, что уменьшает нагрузки на вращающиеся детали в условиях высоких температур [17].

На демонстрационном ТПД RTA-1 предполагалось экспериментально исследовать:

- обеспечение согласованной работы вентилятора, газогенератора и форсажно-прямоточной камеры (ФПК) во всем диапазоне скоростей полета;
- новый первый каскад вентилятора и первую, двухъярусную ступень КВД, второй ярус которой располагается в канале наружного контура и является вторым каскадом вентилятора (core-driven fan stage, CDFS);
- управление новыми и существующими узлами с изменяемой геометрией с целью обеспечения необходимых условий на входе в ФПК;
- обеспечение эффективной работы ФПК в условиях перехода с газотурбинного на прямоточный режим без потери тяги;
- обеспечение управления тепловым состоянием конструкции при высоких температурах воздуха на входе в двигатель;
- возможность применения в двигателе топлива JP-8.

Для отработки одной из важнейших технологий КСУ с отдельными контурами – перехода с газотурбинного на прямоточный режим – NASA разработало и изготовило крупномасштабную модель двухпоточного воздухозаборника для экспериментальных исследова-

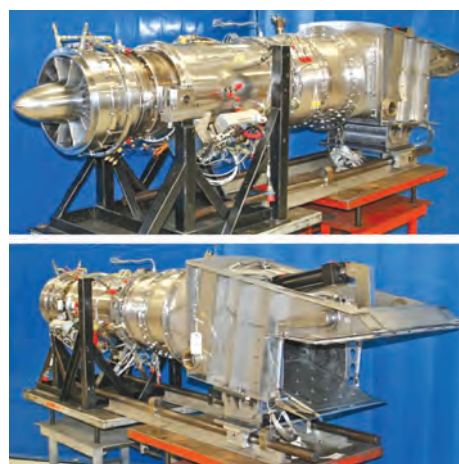


Рис. 13. Демонстрационный ГТД компании Williams International

дований переходных режимов в сверхзвуковой аэродинамической трубе НИЦ им. Гленна NASA. Исследования проводились в рамках проекта Hypersonics программы Fundamental Aeronautics (2007...2014 гг.). На первых этапах испытаний для проверки управляемого перехода использовались дроссельные устройства, которые на последующих этапах будут заменены на ГТД и двухрежимный ГПВРД. Для этого компания Williams International на базе двигателя WJ38 создала двигатель, адаптированный для работы при числе $M_n = 3$ (рис. 13).

Успехи других стран в разработке гиперзвуковых технологий заставили МО США запросить увеличение бюджетного финансирования под эти проекты на 2019 г. Таким образом, МО США ускоряет работы по созданию ГЛА различного назначения с КСУ.

Заключение

США на протяжении 30 лет проводят четко скоординированные программы по отработке технологий принципиально новых силовых установок шестого поколения для военных самолетов. Цели и задачи программ определяет МО США, в их число входят не только улучшение технических характеристик двигателей и интеграции их с ЛА, но и уменьшение стоимости производства и эксплуатации путем создания унифицированных двигателей и применения их на ЛА различного назначения, а также требования

к выработке большого количества электрической энергии в обеспечение работы нового радиоэлектронного оборудования и систем вооружения, включая лазерное, и требования по терморегулированию силовой установки и самолета для обеспечения низкого уровня заметности.

В середине 2020-х гг. ожидается создание унифицированного адаптивного трехконтурного двигателя, который обеспечит возможность создания военных самолетов нового поколения с принципиально новыми характеристиками, кардинально улучшит боевые возможности самолета F-35 и позволит сократить типаж выпускаемых двигателей.

Все большее внимание уделяется разработке технологий для создания многообразных многофункциональных гиперзвуковых систем с числом $M_n \geq 4...6$, способных выполнять не только длительный гиперзвуковой полет, но и, при необходимости, дозаправку в воздухе на дозвуковых скоростях. Такие системы, по мнению американских аналитиков, должны обеспечить боевую эффективность, сравнимую с эффективностью стратегического ядерного оружия. Создание гиперзвуковых ЛА с комбинированными силовыми установками предполагается к 2040 г.

Таким образом, США вплотную приступили к созданию силовых установок с принципиально новыми свойствами, которые должны обеспечить высокую боевую эффективность ЛА шестого поколения.

Литература

1. Скибин В.А., Солонин В.И., Палкин В.А. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний в обеспечение создания перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / Под общ. ред. В.А. Скибина и В.И. Солонина. М.: ЦИАМ, 2010. 676 с.
2. Бабкин В.И., Солонин В.И. Современная методология создания конкурентоспособных авиационных двигателей и место науки в этом процессе // Двигатель. 2017. № 1(109). С. 10–13.
3. Morgan J. Manufacturing Readiness Levels (MRLs). Manufacturing Readiness Assessments (MRAs). In an S&T Environment / U.S. Air Force. Presentation. 2008. 22 p.
4. Koop W. The Integrated High Performance Turbine Engine Technology (IHPTET) Program [A]. ISABE 97-7175. 1997.
5. Turbine Engine Technologies. A Century For Power Of Flight / Air Force Research Laboratory, Propul. Direct. 2002.
6. Warwick G. Power Shift: GE Draws on Past Variable-Cycle Experience for New Combat Engine // Aviation Week & Space Technology. 2012. Vol. 174. No. 36. P. 18.
7. Overview of Versatile, Affordable, Advanced Turbine Engines Program (VAATE). Presentation VAATE PRDA. Pre-Proposal Conference, December 12, 2002 / Air Force Research Laboratory, Propulsion Directorate.
8. Norris G. Engines of Change: New Development Engine Designations Herald Adaptive Era for U.S. Airforce Future Fighters // Aviation Week & Space Technology. 2017. Vol. 179. No. 10. P. 20–21.
9. Simmons R. Design and Control of a Variable Geometry Turbofan with an Independently Modulated Third Stream: Dissertation: presented in partial fulfillment of the requirements for the degree doctor of philosophy in the Graduate School of The Ohio State University. 2009. 112 p.
10. Aerodynamic / Acoustic Performance of YJ101 / Double Bypass VCE with Coannular Plug Nozzle: final report: January 1981 / General Electric; authors: John W. Vdoviak, Paul R. Knott, Jon J. Ebacker. 1981. NASA CR-159869. 318 p.
11. Norris G. Rig Ready: AFRL Evaluations Lead Way Toward Follow-on Three-Stream Engine Development Initiative // Aviation Week & Space Technology. 2016. Vol. 178. No. 25. P. 34.

-
12. Norris G. Power Progress: Adaptive Technology, Ultra-High Bypass and Gears Drive New Engine Developments // Aviation Week & Space Technology. 2017. Vol. 179. No. 25. P. 84–87.
 13. NASA Hypersonics Overview. November 2017. Presentation. 17 p.
 14. Leugers J. Airbreathing Hypersonic Technologies in the Air Force S&T Portfolio. NDIA Science & Engineering Technology Conference, 18 April 2012 / AFRL, Munitions Directorate. 88ABW-2012-2266.
 15. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / Под общ. ред. В.А. Скибина и В.И. Солонина. М.: ЦИАМ, 2004. 424 с.
 16. Беспилотный «Черный стриж» – наследник «черных дроздов» // Национальная оборона. 2017. № 11. URL: <http://www.nationaldefense.ru/includes/periodics/armament/2014/0211/223912635/detail.shtml>
 17. Norris G. Amid SR-72 Rumors, Skunk Works Ramps Up Hypersonics. 2017. URL: <http://aviationweek.com/technology/amid-sr-72-rumors-skunk-works-ramps-hypersonics>

References

1. Skibin V.A., Solonin V.I., Palkin V.A. Raboty vedushchikh aviadvigatelestroitel'nykh kompanii v obespechenie sozdaniia perspektivnykh aviatsionnykh dvigatelei (analiticheskii obzor) [Works of Advanced Aeroengine Development Companies to Ensure Creation of Advanced Aeroengines (Analytical Review)]. Edited by V.A. Skibin and V.I. Solonin. Moscow: CIAM, 2010. 676 p.
2. Babkin V.I., Solonin V.I. Sovremennaiia metodologiya sozdaniia konkurentosposobnykh aviatsionnykh dvigatelei i mesto nauki v etom protsesse [Modern Methodology of Creating Competitive Aircraft Engines and a Role of Science in this Process]. Dvigatel'. 2017. No. 1(109). P. 10–13.
3. Morgan J. Manufacturing Readiness Levels (MRLs). Manufacturing Readiness Assessments (MRAs). In an S&T Environment / U.S. Air Force. Presentation. 2008. 22 p.
4. Koop W. The Integrated High Performance Turbine Engine Technology (IHPTET) Program [A]. ISABE 97-7175. 1997.
5. Turbine Engine Technologies. A Century For Power Of Flight / Air Force Research Laboratory, Propulsion Directorate. 2002.
6. Warwick G. Power Shift: GE Draws on Past Variable-Cycle Experience for New Combat Engine // Aviation Week & Space Technology. 2012. Vol. 174. No. 36. P. 18.
7. Overview of Versatile, Affordable, Advanced Turbine Engines Program (VAATE). Presentation VAATE PRDA. Pre-Proposal Conference, December 12, 2002 / Air Force Research Laboratory, Propulsion Directorate.
8. Norris G. Engines of Change: New Development Engine Designations Herald Adaptive Era for U.S. Airforce Future Fighters // Aviation Week & Space Technology. 2017. Vol. 179. No. 10. P. 20–21.
9. Simmons R. Design and Control of a Variable Geometry Turbofan with an Independently Modulated Third Stream: Dissertation: presented in partial fulfillment of the requirements for the degree doctor of philosophy in the Graduate School of The Ohio State University. 2009. 112 p.
10. Aerodynamic / Acoustic Performance of YJ101 / Double Bypass VCE with Coannular Plug Nozzle: final report: January 1981 / General Electric; authors: John W. Vdoviak, Paul R. Knott, Jon J. Ebacker. 1981. NASA CR-159869. 318 p.
11. Norris G. Rig Ready: AFRL Evaluations Lead Way Toward Follow-on Three-Stream Engine Development Initiative // Aviation Week & Space Technology. 2016. Vol. 178. No. 25. P. 34.
12. Norris G. Power Progress: Adaptive Technology, Ultra-High Bypass and Gears Drive New Engine Developments // Aviation Week & Space Technology. 2017. Vol. 179. No. 25. P. 84–87.
13. NASA Hypersonics Overview. November 2017. Presentation. 17 p.
14. Leugers J. Airbreathing Hypersonic Technologies in the Air Force S&T Portfolio. NDIA Science & Engineering Technology Conference, 18 April 2012 / AFRL, Munitions Directorate. 88ABW-2012-2266.
15. Raboty vedushchikh aviadvigatelestroitel'nykh kompanii po sozdaniiu perspektivnykh aviatsionnykh dvigatelei (analiticheskii obzor) [Works of Advanced Aeroengine Development Companies to Creation of Advanced Aeroengines (Analytical Review)]. Edited by V.A. Skibin and V.I. Solonin. Moscow: CIAM, 2004. 424 p.
16. Bepilotnyi "Chernyi strizh" – naslednik "chernykh drozdov" [Unmanned Aerial Vehicle “Blackswift” – Heir to the “Blackbird”]. Natsional'naia oborona [National Defence]. 2017. No. 11. URL: <http://www.nationaldefense.ru/includes/periodics/armament/2014/0211/223912635/detail.shtml>
17. Norris G. Amid SR-72 Rumors, Skunk Works Ramps Up Hypersonics. 2017. URL: <http://aviationweek.com/technology/amid-sr-72-rumors-skunk-works-ramps-hypersonics>

Материалы получены редакцией 01.10.2019
