

Обзор работ в США и Европе по созданию авиационных комплексов нового поколения и двигателей для их силовых установок

Палкин В.А.

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

Рассмотрено текущее состояние фронтовой авиации и основные направления работ в США и Европе по созданию авиационных комплексов шестого поколения и двигателей для их силовых установок. Показано, что авиационные комплексы шестого поколения, с большой вероятностью, будут включать пилотируемые и беспилотные летательные аппараты различного назначения, объединенные в сетевую боевую группу (платформу), состав которой может меняться в зависимости от поставленной задачи. Эта группа будет способна, используя защищенное информационное пространство, осуществлять взаимодействие с другими воздушными, морскими и наземными платформами военного назначения. Координация действий и управление отдельными летательными аппаратами, входящими в состав сетевой боевой группы, будут осуществляться с командного пункта – пилотируемого или беспилотного истребителя шестого поколения, обладающего очень низким уровнем заметности и возможностью применения новых видов оружия, включая гиперзвуковое. В силовой установке перспективного истребителя будет применяться адаптивный двигатель, обеспечивающий ему оптимальные характеристики в различных условиях полета.

Ключевые слова: авиационный комплекс, авиационный двигатель, истребитель шестого поколения, фронтовая авиация, критические технологии, силовая установка, беспилотный летательный аппарат

Review of the works in the USA and Europe on the new generation of aviation complexes and aero engines for their propulsion systems

Palkin V.A.

CIAM, Moscow

The current state of the fighter and strike aviation and main directions of works in the USA and Europe on creation of the 6th generation aviation complexes and engines for their propulsion systems are considered. It is shown that the 6th generation aviation complexes are likely to include manned and unmanned aerial vehicles for various purposes, united into a network combat group (platform), which composition may vary depending on the mission. This group will be able to interact with other military air, sea and land platforms through a secure network. Coordination and control of individual flying vehicles of the network combat group will be carried out from the command post – a manned or unmanned 6th generation fighter with a very low level of visibility and the ability to use new types of weapons, including hypersonic ones. An adaptive engine will be used in the propulsion system of the advanced fighter, providing them an optimal performance in various flight conditions.

Keywords: aviation complex, aero engine, sixth generation fighter, combat air, critical technologies, propulsion system, unmanned aerial vehicle

Введение

Поставки авиационной техники военного назначения (АТВН) традиционно приносили ее производителям высокие доходы. Рынок был четко разделен, а трения между производителями в отношении долей на нем были минимальны. До начала 1990-х годов правительства зарубежных стран тратили на разработку и приобретение АТВН большие средства, существенно превышавшие аналогичные затраты на авиационную технику гражданского назначения (АТГН).

Развал блока стран Варшавского договора в конце 1980-х – начале 1990-х годов резко изменил ситуацию в области разработки и производства вооружения. Правительства многих стран пересмотрели свои военные доктрины и бюджеты, что привело к резкому сокращению расходов на разработку и закупку новых видов вооружения, а также к пересмотру содержания или прекращению программ по их созданию. Бюджетные средства стали выделяться на разработку «двойных» технологий, а производители направили свои основные усилия на создание и реализацию АТГН. В результате выручка от реализации АТГН стала в ~2,5...5 раз превышать затраты на разработку и приобретение АТВН [1; 2].

Однако наличие локальных конфликтов в определенных регионах мира и провозглашение доктрины борьбы с терроризмом повлияли на военные бюджеты ряда стран, прежде всего США: средства стали тратиться как на разработку новых, так и на модернизацию находящихся в эксплуатации систем вооружения.

Как показывает практика, модернизация позволяет продлить срок службы авиационной техники не более чем на 10 лет, после чего затраты на ее поддержание в боеспособном состоянии становятся сопоставимы с затратами на приобретение новых образцов.

Локальные конфликты 1990–2010-х годов, в которых участвовали западные страны, показали, что без широкомасштабного применения авиационной техники различного назначения невозможно оперативно решать поставленные задачи и необходимо создание новых авиационных комплексов (АК), прежде всего самолетов фронтовой (тактической) авиации и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Основываясь на результатах проводимых в настоящее время программ, зарубежные производители авиационной техники, прежде всего в США, работают над проектами АК шестого поколения, которые по своим показателям будут существенно превосходить АК пятого поколения. Применяемые в них технологии будут направлены как на повышение эффективности, так и на снижение всех составляющих стоимости жизненного цикла [3; 4].

Состояние фронтовой авиации в США и Европе

На протяжении всего периода существования летательных аппаратов с газотурбинными двигателями движущей силой их развития была и остается военная авиация. Наиболее быстро развивались самолеты фронтовой авиации и двигатели для их силовых установок, именно в них в первую очередь внедрялись новые конструкторские решения, технологии и материалы. Развитие двигателей фронтовой авиации осуществлялось в соответствии с ужесточением требований к силовой установке для обеспечения существенного улучшения тактико-технических характеристик самолетов.

К концу 1970-х – началу 1980-х годов вооруженные силы США и ряда стран Европы располагали современными авиационными комплексами фронтовой авиации четвертого поколения (F-14, F-15, F-16, F-18, Tornado, Mirage 2000), в составе силовых установок которых применялись турбореактивные двухконтурные двигатели с форсажной камерой (ТРДДФ) TF30 и F100 компании Pratt & Whitney, F110 и F404 компании General Electric, RB199 компании Turbo-Union (Европа) и M53 компании Safran. Применявшаяся в то время за рубежом методология создания АТВН обуславливала поступление на вооружение техники, частично удовлетворявшей заданным требованиям, после чего начиналась ее продолжительная доводка в процессе эксплуатации. Так, например, доводка ТРДДФ F100 и M53 до заданных технических требований шла более 20 лет [3; 4].

Одним из основных отличий авиационных комплексов четвертого поколения от третьего стали высокие маневренные характеристики с выходом на углы атаки более 30° и осуществление предельных по тяге виражей благодаря применению в их силовых установках ТРДДФ с малой степенью двухконтурности, обеспечивающих самолету тяговооруженность больше единицы [5].

Однако быстрое развитие авиационной техники и изменение доктрины применения тактической авиации привели к разрыванию работ, направленных на создание принципиально новых истребителей – пятого поколения, которые предполагалось принять на вооружение уже в середине 1990-х годов. Такие работы в середине 1980-х годов были развернуты как в США, так и в Европе.

В США требования к «истребителю завоевания превосходства в воздухе» пятого поколения были сформулированы в начале 1980-х годов: максимальный взлетный вес не более 23 т, боевой радиус действия не менее 1300 км, взлет с ВПП длиной не более 610 м, сверхзвуковой крейсерский полет при числе Маха

$M_{кр} = 1,4 \dots 1,5$ на бесфорсажном режиме, низкий уровень заметности [6].

С окончанием холодной войны работы, связанные с реализацией программ создания новой авиационной техники различного назначения, были либо заморожены, либо в них были изменены приоритеты. Переоснащение военно-воздушных сил западных стран новой техникой, намечавшееся на середину 1990-х годов, было отложено на более поздние сроки.

По состоянию на май 2019 г. мировой парк летательных аппаратов военного назначения состоял из ~54 000 самолетов и винтокрылых летательных аппаратов (без учета БПЛА), из которых ~25% относились к вооруженным силам США. При этом существующий парк авиационных комплексов состоит преимущественно из АК четвертого поколения, на долю которых в середине 2019 года приходилось ~94% самолетов с большим сроком службы [7].

Так, в 2020 г. средний возраст самолетов всего парка ВВС США составил ~29 лет (рис. 1) [8], самолетов фронтовой авиации – 28 лет (несмотря на ввод в эксплуатацию в период 2005...2020 годов новых истребителей F-22 и F-35), а стратегических бомбардировщиков – 44 года. Самыми «старыми» в парке были стратегические бомбардировщики B-52H (средний возраст 59 лет), а самыми «молодыми» – истребители F-35A (средний возраст 4 года).

Кроме того, из-за задержки развертывания производства самолетов пятого поколения значительно трансформировались концепции их боевого применения и соотношения в составе ВВС. В связи с этим спрос на истребители четвертого поколения может сохраниться еще как минимум в течение ближайшего десятилетия. Согласно прогнозам, до 2026 года объем экспортных поставок истребителей четвертого поколения составит ~900 единиц, при этом доля России на доступных ей рынках может составить около 240 самолетов [5].

Ведущим поставщиком двигателей для летательных аппаратов военного назначения, находящихся в эксплу-



Рис. 1. Средний возраст и численность парка самолетов ВВС США [8]

атации, является компания General Electric, доля которой в мировых поставках авиадвигателей в середине 2020 года составляла ~32%. При этом в вооруженных силах США на долю компании General Electric приходилось ~58% поставок двигателей для самолетов фронтовой и стратегической авиации, 55% – для военнотранспортных самолетов и топливозаправщиков и ~71% – для вертолетов [9].

Для поддержания боеспособности и увеличения срока службы парка АК четвертого поколения в ряде стран, кроме их закупки, были разработаны программы модернизации с включением в них технических решений из программ разработки перспективных технологий.

Следует отметить, что программы по двигателям военного и гражданского назначения дополняют друг друга, поскольку на ~80% используют общие технологии при создании новых и модернизации находящихся в эксплуатации двигателей. Так, например, на базе газогенератора двигателя F101 компании General Electric, предназначенного для бомбардировщика B-1B, было создано семейство ТРДД CFM56, которое со временем стало самым востребованным для силовых установок семейств пассажирских самолетов Airbus A320 и A340 и Boeing 737 из-за своих высоких эксплуатационных характеристик (за 46 лет выпущено около 34 000 двигателей, их доля в оснащении самолетов семейств A320 и 737 составляет ~70%). В свою очередь, когда потребовалось увеличить ресурс двигателей F110 компании General Electric, в рамках программы Service Life Extension Program (SLEP) были использованы технологии и технические решения, разработанные для двигателей семейства CFM56 [3; 10].

Благодаря постоянно проводимым программам модернизации, двигатели четвертого поколения по ряду показателей приближаются к двигателям пятого поколения. Так, в рамках программ модернизации межремонтный ресурс двигателей F100 и F110 был увеличен до 6000 п.ч., что соответствует 25...30 годам безопасной эксплуатации, а максимальное значение температуры газа на входе в турбину высокого давления (ТВД) было увеличено до $T_{г\max}^* \geq 1750 \dots 1800$ К [11; 12].

В настоящее время за рубежом (без учета КНР) в эксплуатации находится два АК пятого поколения: F-22 с ТРДДФ F119-PW-100 взлетной тягой $R_{0ф} \approx 156$ кН (с 2005 г.) и F-35 с ТРДДФ F135 взлетной тягой $R_{0ф} \approx 182 \dots 192$ кН, созданным на основе газогенератора двигателя F119-PW-100 (с 2015 г.). Оба двигателя разработаны компанией Pratt & Whitney. АК пятого поколения также разрабатываются в Японии, Турции и Индии, но для них не предусмотрено создание двигателей пятого поколения.

После поставки 187 серийных самолетов производство F-22 в мае 2012 г. было прекращено, а после пос-

тавки 507-го двигателя в том же году было прекращено и серийное производство F119-PW-100. В настоящее время осуществляется модернизация F-22 с целью улучшения его тактико-технических характеристик. ВВС США планируют эксплуатировать истребители F-22 до 2040 г. [13; 14].

К февралю 2021 г. в эксплуатации находилось более 615 самолетов F-35 разных вариантов. Всего до 2044 г. планируется поставить более 3300 самолетов F-35 для вооруженных сил США, стран Европы, Ближнего Востока и Юго-Восточной Азии [15; 16].

Применение двигателей пятого поколения в составе силовой установки обеспечивает самолету возможность совершать крейсерский полет со сверхзвуковой скоростью на бесфорсажном режиме ($M_{кр} \approx 1,4$), высокую маневренность, низкий уровень заметности и высокую боевую живучесть. Эти показатели обеспечиваются за счет повышения температуры газа перед турбиной ($T_{г\max}^* \geq 1950 \dots 2000$ К) при умеренных значениях степени двухконтурности ($m_0 \approx 0,3 \dots 0,6$) и суммарной степени повышения давления в компрессорах ($\pi_{к\Sigma}^* \approx 26 \dots 28$), повышения эффективности (КПД) высоконагруженных узлов на $\sim 2 \dots 3\%$, применения новых конструкторских решений (полые лопатки вентилятора, рабочие колеса компрессора типа блиск) и конструкционных материалов (порошковые и монокристаллические сплавы, композиты), а также других наукоемких конструкторских и технологических решений. При этом отношение тяги к весу двигателя достигло $R_{0ф}/G_{дв} \approx 10$, ресурс горячей и холодной частей двигателя составил соответственно 4325 п.ц. (4700 п.ц. для F135) и 8650 п.ц. (9400 п.ц. для F135), лобовая тяга увеличилась на $\sim 20\%$, а удельный расход топлива на форсажном режиме уменьшился на $\sim 13 \dots 20\%$ [3].

В Европе основными АК фронтовой авиации являются Rafale компании Dassault Aviation с ТРДДФ M88 взлетной тягой $R_{0ф} \approx 75$ кН (в эксплуатации с 2001 г., Франция) и Турбоон консорциума Eurofighter International с ТРДДФ EJ200 взлетной тягой $R_{0ф} \approx 90$ кН (в эксплуатации с 2003 г., Великобритания, Германия, Италия, Испания). Оба этих комплекса относятся к поколению 4+. Турбоон с ТРДДФ EJ200 наиболее близок к истребителю пятого поколения, так как способен совершать сверхзвуковой крейсерский полет при $M_{кр} \approx 1,2$, а ТРДДФ EJ200 имеет температуру газа на входе в лопатки рабочего колеса первой ступени ТВД $T_{41}^* \approx 1800$ К и отношение $R_{0ф}/G_{дв} \approx 10$ [17].

В 2019 г. в страны Европы, которые являются партнерами компании Lockheed Martin по программе JSF (Joint Strike Fighter), начались поставки АК пятого поколения F-35 [18; 19].

В США и ряде стран Европы (Великобритания, Франция, Германия, Испания, Италия, Швеция) идут



Рис. 2. Перспективные авиационные комплексы ВВС США [3]

работы по программам создания АК шестого поколения и двигателей для их силовых установок; ввод в эксплуатацию этих комплексов ожидается не ранее 2030...2040 годов (в США он может состояться в 2028...2032 годах) [20].

Наиболее активные работы в этом направлении ведут США. Так, в рамках программы VAATE (Versatile Affordable Advanced Turbine Engines), начавшейся по инициативе ВВС США в 2003 г., рассматривалось несколько перспективных авиационных комплексов, для двигателей которых разрабатывались перспективные технологии (рис. 2) [3].

Начиная с 2007 г. Министерство обороны США последовательно проводит работы по программам VAATE, AETD (Adaptive Engine Technology Development), AETP (Adaptive Engine Transition Program), направленным на разработку демонстрационного адаптивного двигателя (двигателя изменяемого цикла), с применением технологий, обеспечивающих повышение топливной эффективности летательных аппаратов различного назначения на 25...35%. Применение интегрированной с планером силовой установки с таким двигателем позволит создать многоцелевые самолеты, обладающие оптимальными характеристиками в различных условиях полета [3; 4].

Для создания такого двигателя разрабатываются критические технологии, обеспечивающие регулирование в широком диапазоне степени двухконтурности, работоспособность при высоком уровне параметров рабочего процесса ($\pi_{к\Sigma}^* \approx 40 \dots 70$, $T_{г\max}^* \approx 2200 \dots 2400$ К), управление течением в лопаточных машинах и горением в камере сгорания, эксплуатацию двигателя с допустимым уровнем повреждения деталей. В ходе указанных выше программ были созданы демонстрационные газогенераторы и двигатели и проведены их стендовые испытания, результаты которых показали возможность реализации поставленных целей [3].

На 2021 г. запланировано проведение стендовых испытаний трехконтурных двигателей-демонстраторов XA100 компании General Electric и XA101 компании Pratt & Whitney, по результатам которых будет выбрана компания для проведения этапа опытно-конструкторских работ (ОКР) [21].

Авиационные комплексы шестого поколения

На протяжении более 40 лет в основе ведения боевых действий в воздушном пространстве ВВС западных стран лежит концепция завоевания превосходства в воздухе, которая в современных условиях уже не может быть обеспечена существующими АК четвертого и пятого поколений. Благодаря постоянным инвестициям в разработку новых видов авиационной техники, вооружения, включая гиперзвуковое, и технологий для обеспечения низкого уровня заметности, вероятными противниками созданы интегрированные системы противовоздушной обороны (ПВО), труднопреодолимые для существующих летательных аппаратов. В связи с этим западные страны стремятся создать новую, масштабируемую, гибкую и динамичную систему вооружения [22].

Несмотря на то что работы по АК шестого поколения ведутся в США и Европе не первый год, информации о требованиях к ним в СМИ не много. Наиболее открыто свою точку зрения на АК шестого поколения и ряд требований к нему высказала компания Airbus. По ее мнению, основой нового АК станет пилотируемый истребитель шестого поколения, объединение которого с БПЛА различного назначения предоставит вооруженным силам европейских стран возможности, значительно превосходящие те, которыми обладают современные истребители. При этом сам истребитель в составе такой группы будет представлять собой более сложную платформу, чем современные [22; 23].

Прежде всего, истребитель шестого поколения будет обладать более высокой боевой живучестью и низким уровнем заметности. Самолет будет иметь чрезвычайно мощную авионику с набором необходимых средств обнаружения. Увеличение вычислительной мощности бортового компьютера для получения, обработки и хранения информации позволит пилоту лучше оценивать боевую обстановку, полагаясь на данные не только собственного самолета, но и других воздушных, морских, космических и наземных платформ военного назначения. Благодаря технологии искусственного интеллекта и возможности совместной работы с беспилотными платформами, истребитель будет выполнять функции командного пункта, способного действовать глубоко в воздушном пространстве противника (рис. 3) [22; 23].

Мощные двигатели с управляемым вектором тяги и высокопроизводительная система управления полетом обеспечат истребителю шестого поколения высокую маневренность, скорость и дальность полета. Применение традиционного и инновационного вооружения, включая гиперзвуковые ракеты и оружие направленной энергии (лазерное и микроволновое), обеспечит ему беспрецедентную огневую мощь и возможность ведения радиоэлектронной борьбы (в том числе кибератак).

Создание более сложной техники требует больших затрат на ее разработку, что может привести к сокращению ее количества до критического уровня. Проведенные исследования показали, что для завоевания превосходства в воздухе необходимо соответствующее количество пилотируемых летательных аппаратов. В связи



Рис. 3. Возможная структура АК шестого поколения, предлагаемая компанией Airbus [23]

с этим важно установить разумный уровень характеристик истребителя шестого поколения, включая заметность, маневренность, скорость и дальность полета, возможности обнаружения цели и т.д.

Для выполнения сложных задач в условиях жесткого противодействия со стороны потенциального противника одного истребителя будет недостаточно, его необходимо объединить с беспилотными платформами различного назначения. Такие группы будут выполнять разные задачи (захват цели, разведка, радиоэлектронная борьба, поражение воздушных и наземных целей и т.д.), а возможность изменять состав группы повысит общую эффективность выполнения боевого задания, а также эффективность и боевую живучесть новой системы вооружения. Благодаря новой тактике, основанной на совместном применении необходимого количества летательных аппаратов разного типа, использовании обманных маневров и создании численного превосходства, истребитель будет оставаться на безопасном расстоянии, пока БПЛА будут устранять угрозу [22].

В рамках нового АК боевая группа, объединяющая пилотируемые и беспилотные платформы, обеспечит разведку и предоставление информации об обстановке в районе ведения боевых действий благодаря мгновенному сбору, обработке и совместному использованию огромного объема данных со всех подключенных платформ. Это позволит анализировать и координировать действия боевых групп в режиме реального времени, обеспечит выбор лучших тактических вариантов [22; 23].

Европейские страны во многом разделяют взгляды компании Airbus на новую систему вооружения, но единого мнения об истребителе шестого поколения нет. Так, компания BAЕ Systems (Великобритания) предлагает беспилотный перспективный истребитель, а пилотируемый вариант рассматривает как опцию, причем беспилотный и пилотируемый варианты предполагает реализовать в одном самолете [24].

Что касается США, то требования ВВС и ВМС к АК шестого поколения не противоречат друг другу, а требования к перспективному истребителю сильно различаются, так как он должен заменить самолеты F-15C/D и F-18E/F/G и дополнить возможности F-22 и F-35C, предназначенных для выполнения разных задач [25–27]. Ожидается, что ВВС и ВМС США представят свои первые истребители для АК шестого поколения в 2025...2030 годах. Однако задержки в производстве и поставке истребителей пятого поколения F-35 и малое количество информации о ходе работ по АК шестого поколения заставляют предположить, что более реалистичные сроки начала эксплуатации – 2030...2035 годы.

Работы по авиационным комплексам шестого поколения в США

Для сохранения мирового лидерства в разработке авиационной техники в США организованы работы по созданию научно-технического задела (НТЗ) для летательных аппаратов различного назначения и двигателей для их силовых установок. В целях достижения максимально возможного уровня технического совершенства, снижения сроков и стоимости разработки авиационной техники в рамках специальных программ постоянно ведется опережающая разработка критических технологий и отработка новых технических решений на демонстраторах технологий. Во многом благодаря этим программам, проводимым при активной поддержке государства, и обеспечивается конкурентоспособность компаний США на мировом рынке. **Летательные аппараты.** В декабре 2005 г. первый в мире истребитель пятого поколения – американский F-22 – был принят на вооружение ВВС США. Серийный выпуск F-22 был прекращен в 2012 г. При этом в рамках реализации программы JSF был создан, запущен в 2011 г. в серийное производство и в 2015...2019 годах принят на вооружение рядом государств (США, Израиль, Италия, Великобритания, Нидерланды, Норвегия, Япония, Австралия и Республика Корея) многоцелевой истребитель пятого поколения F-35. При нынешнем темпе поставок F-35 выпуск этих самолетов для выполнения существующих заказов будет продолжаться до 2044 г. [15; 18; 19].

Необходимо напомнить, что в США Министерство обороны отвечает не за реализацию национальной оборонной доктрины, а за техническое и материальное обеспечение ее реализации, т.е. за поиск путей приобретения большего количества техники за меньшие деньги. С этой точки зрения переход к беспилотным летательным аппаратам становится экономически более выгоден. С начала 2000-х годов Министерство обороны США стало финансировать работы по созданию БПЛА различного назначения, хотя это в определенной степени и противоречило планам промышленности и вооруженных сил, которые были заинтересованы в завершении существующих программ и сохранении бюджетного финансирования для их реализации. Кроме того, военные не до конца понимали, какие функции будут отведены БПЛА в будущих операциях и какую часть парка пилотируемой техники они смогут заменить. Однако инициатива Министерства обороны США вызвала бурное развитие БПЛА в различных странах. При этом ведомство продолжало вести работы по пилотируемым летательным аппаратам [28].



а



б

Рис. 4. Концепции истребителей шестого поколения:
а – для ВВС США, Boeing [32]; б – для ВМС США, Lockheed Martin [33]

Работы по АК шестого поколения начались в США в начале 2010-х годов. Их инициировали ВВС и ВМС, которые были озабочены снижением боеспособности парка своих самолетов-истребителей и хотели иметь к 2025...2030 годам новые самолеты, способные заменить F-15C и F-18E/F/G и дополнить боевые возможности F-22 и F-35C. Первоначально АК шестого поколения рассматривались как самолеты с расширенными возможностями в сравнении с истребителями пятого поколения F-22 и F-35C.

Непосредственно к работам по истребителям шестого поколения, получившим обозначение F-X (ВВС) и F/A-XX (ВМС), ВВС и ВМС США приступили в апреле 2012 г., выпустив «запросы на информацию» (request for information). Ряд производителей объявил о своих намерениях: подразделения Phantom Works компании Boeing и Skunk Works компании Lockheed Martin начали публиковать информацию о системах, которые они могли бы разработать (рис. 4) [29–33].

В том же году Управление перспективных научно-исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA) начало исследование «Инициатива доминирования в воздухе» (Air Dominance Initiative), в котором пыталось объединить концепции ВВС и ВМС США. В марте 2014 г. исследование было завершено, ведущие военные и технические эксперты пришли к выводу, что «ни одна новая технология или платформа не сможет сдержать и победить сложные и многочисленные системы вероятного противника, находящиеся в стадии разработки». Было предложено создавать не отдельные самолеты, а сетевые платформы (авиационные комплексы), объединенные в семейство систем (family of systems, FoS), которые включали бы пилотируемые и беспилотные летательные аппараты различного назначения, обладающие надежной навигацией, активными и пассивными средствами обороны, перспективными средствами обнаружения, кибертехнологиями, возможностью вести радиоэлектронную борьбу и действовать на удалении от зоны боевых действий [30; 31].

При создании истребителей шестого поколения для ВВС и ВМС США должны были соблюдаться следующие принципы [32]:

- ВВС и ВМС США с учетом решаемых задач нуждаются в разных самолетах;
- самолеты необходимо оптимизировать для действия на больших расстояниях над Тихим океаном;
- самолеты должны обладать низким уровнем заметности в широком диапазоне частот;
- в самолетах должна применяться открытая архитектура с возможностью обновления;
- самолеты должны обеспечивать завоевание превосходства в воздухе.

Проведенное исследование подтолкнуло DARPA начать в 2015 г. работы в рамках «Инициативы аэрокосмических инноваций» (Aerospace Innovation Initiative), цель которой состояла в разработке и проведении летных испытаний прототипов двух самолетов серии «X» (X-plane), демонстрирующих критические технологии для перспективных летательных аппаратов. Один прототип самолета должен был удовлетворять требованиям ВВС США (F-X), а другой – требованиям ВМС США (F/A-XX). В дальнейшем «Инициатива аэрокосмических инноваций» переросла в программу «Превосходство в воздухе следующего поколения» (Next Generation Air Dominance, NGAD) [31; 34].

В 2016 г. ВВС США разработали «План превосходства в воздухе к 2030 году» (Air Superiority 2030 Flight Plan). Документ частично перекликался с положениями исследования DARPA, особенно в части необходимости создания семейства систем, а также содержал вывод о том, что для обеспечения превосходства в воздухе ВВС США необходимо приобрести тактический самолет нового поколения Penetrating Counter-Air (PCA) [31; 35].

Самолет PCA представлял собой пилотируемый истребитель шестого поколения, концепции которого прорабатывались компаниями Boeing, Lockheed Martin и Northrop Grumman. Согласно плану ВВС, PCA предназначен для ведения воздушного боя как самостоя-

тельно, так и с помощью других летательных аппаратов, которым он может передавать необходимую информацию о целях по каналам защищенной связи (военный интернет). Самолет должен обладать низким уровнем заметности и перспективными средствами обнаружения цели, возможностью работать совместно с роем беспилотных авиационных систем, иметь на борту ракеты большой дальности и, возможно, оружие направленной энергии. Применение искусственного интеллекта позволит сделать самолет одноместным, с возможностью дополнительного укомплектования экипажем [35].

ВМС США со своей стороны также провели анализ с определением требований к NGAD. Основным из них было улучшение защиты авианосцев, которые становятся все более уязвимыми для современных противокорабельных крылатых ракет большой дальности и баллистических ракет.

Два проекта NGAD не связаны между собой и планов по их объединению нет, поскольку требования ВВС и ВМС США сильно различаются, хотя ряд технологий может быть общим. ВМС США выступили с предложением закупить военно-морскую версию PCA ВВС США, не желая платить за возможности, которые им не нужны, и стремясь к некоторой общности нового самолета с F-35C, что может удешевить F/A-XX [35].

ВВС США по-прежнему уделяют большое внимание низкому уровню заметности для проникновения в воздушное пространство противника, тогда как ВМС планируют использовать для этой цели крылатые ракеты на борту F/A-XX или передать выполнение этой задачи ВВС. Военно-морские силы сосредоточены на увеличении дальности, скорости полета и полезной нагрузки, низкий уровень заметности играет второстепенную роль, но рассматривается как один из способов обеспечения более высокого уровня боевой живучести истребителя [35].

ВМС США могут не приобретать новый истребитель, а объединить в сеть корабельные системы с пилотируемыми и беспилотными летательными аппаратами, для чего потребуются приобрести модернизированные F/A-18E/F и F-35C.

Создание нового истребителя может оказаться длительным, сложным и дорогим, в то время как оборонный бюджет США ограничен рядом конкурирующих программ. Эти обстоятельства могут привести к относительно быстрому устареванию самолета: возможности и технологии вероятного противника неизбежно изменятся за время, необходимое для разработки и вывода на рынок истребителя в рамках традиционной крупномасштабной программы, что потребует скорейшей модернизации или срочной замены [35].

В декабре 2018 г. бюджетное управление конгресса США, взяв за основу концепцию самолета PCA, способ-

ного выполнять все поставленные задачи (типа F-22 и F-35), прогнозировало, что первый из 414 самолетов PCA при вводе в эксплуатацию в 2030 г. будет стоить около 300 млн долл., а в январе 2020 г. сообщило, что общие расходы на их закупку в 2028...2050 годах могут составить 130 млрд долл.

Однако в 2019 г. взгляд ВВС США на содержание программы NGAD резко изменился: PCA стал не самолетом в обычном понимании, способным самостоятельно решать широкий круг боевых задач, а набором отдельных технологий и прототипов (демонстраторов технологий), которые подтвердили бы свою целесообразность и показали бы многообещающие результаты в ходе испытаний. Такой подход к программе NGAD привел к тому, что ее бюджет на 2020...2024 финансовые годы был сокращен с 13,2 до 6,1 млрд долл. [31].

Одновременно с изменением представления о PCA министерство обороны из-за большой продолжительности и высокой стоимости создания новой авиационной техники пересмотрело свою стратегию приобретения систем вооружения. В 2019 г. в структуре ВВС министерство создало новый отдел, координирующий работы по программе NGAD, и приняло новую систему – Digital Century Series, цель которой заключается в применении цифровой инженерии, искусственного интеллекта и облачных технологий при разработке, производстве и эксплуатации системы вооружения [31; 36–38].

В качестве примера на рис. 5 показана продолжительность этапа ОКР по самолетам военного назначения в США, в среднем она составляла не менее 15 лет [39]. При этом стоимость этапа ОКР для стратегического бомбардировщика B-2 составила ~24 млрд долл., для истребителя F-22 – ~32 млрд долл., для истребителей F-35 – ~43,5 млрд долл., а стоимость создания топливозаправщика KC-46 (создается на базе пассажирского самолета Boeing 767) оценивается в ~6 млрд долл. без учета стоимости ОКР по двигателям [40–43].

По мнению разработчиков новой системы, она позволит конструкторам быстро определить влияние даже незначительного изменения конструкции на жизненный цикл изделия, в том числе на стоимость производства и срок службы отдельной детали и изделия в целом.

Кроме того, новая система предполагает, что не головной исполнитель, а ВВС США будут владеть основными правами на разработку и исходный код операционной системы. Разработчик системы вооружения должен будет предоставить набор цифровых чертежей, а ее производством, модернизацией и техническим обслуживанием могут заниматься любые компании на конкурсной основе.

В настоящее время основной подход ВВС США к программе NGAD состоит в том, чтобы с использова-



Рис. 5. Продолжительность создания самолетов военного назначения в США [39]

нием пяти ключевых технологий осуществить разработку и начать производство небольшими партиями одновременно нескольких типов летательных аппаратов, а через 15 лет вывести их из эксплуатации. Такой подход окажет серьезное влияние на оборонную промышленность США, так как основные компании, выпускающие авиационную технику военного назначения, могут потерять до 50% своих доходов [1; 2].

В сентябре 2020 г. появилась информация о том, что в США создан и проходит летные испытания натурный демонстратор технологий перспективного летательного аппарата, созданного по программе NGAD. Представитель Министерства обороны США заявил, что летательный аппарат был построен всего через год после выбора проекта и создания виртуальной модели [28; 36]. Реализация программы NGAD в такие сжатые сроки может поставить под угрозу программы F-35 и F-15EX, создав им конкурента в финансировании закупок для ВВС и ВМС США [28].

Представив демонстрационный образец летательного аппарата по программе NGAD, разработчики новой системы говорят о том, что их подход в отличие от традиционного позволит вводить в эксплуатацию летательные аппараты нового поколения быстрее и за меньшие средства. ВВС США будут более оперативно проводить обновление парка фронтовой авиации, нежели сегодня, когда каждый новый самолет разрабатывается не менее 15 лет, а затем десятилетиями находится в серийном производстве и эксплуатации.

Созданные в рамках программы летательные аппараты планируется приобретать небольшими партиями, по 50...80 самолетов в год, и покупать новый истребитель каждые восемь лет, а через 15...16 лет полностью его заменять, прежде, чем он достигнет отметки в 3500 летных часов, когда необходимо начинать проводить капитальный ремонт и дорогостоящую модернизацию для продления срока службы. Согласно подсчетам, по прошествии 15...16 лет расходы на техническое обслуживание самолета быстро растут, увеличиваясь каждый год на 3...7% [44].

Проведенные специалистами Министерства обороны США расчеты показали, что при новом подходе затраты на разработку увеличатся на ~25%, затраты на производство возрастут на 18%, но стоимость модернизации упадет на ~79%, а расходы на эксплуатацию сократятся на ~49% [45].

В руководстве Министерства обороны США предложили для образцов вооружения и военной техники, разработанных по такой стратегии, использовать литеру «e» (e-plane) перед традиционным буквенно-цифровым обозначением на период проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ [36].

Целесообразность и эффективность применения новой системы демонстрируют работы компаний Boeing и SAAB по созданию нового учебно-тренировочного самолета T-7A и работы компании Northrop Grumman по созданию межконтинентальной баллистической ракеты шахтного базирования GBSD [36].

Силовые установки. В бюджетных документах, выпущенных ВВС США в 2020 г., сообщалось, что в рамках программы «Адаптивная силовая установка нового поколения» (Next Generation Adaptive Propulsion, NGAP) планируется поставить сертифицированный адаптивный двигатель в 2025 финансовом году. Сроки реализации программы предполагают, что летные испытания начнутся уже в 2026 финансовом году, и это будет не демонстратор, а серийный двигатель [31]. Однако не всем летательным аппаратам, входящим в семейство систем, разрабатываемых по программе NGAD, нужны силовые установки с адаптивным двигателем.

Работы по созданию НТЗ для двигателей шестого поколения: программы Министерства обороны США VAATE, AETD, AETP, INVENT (Integrated Vehicle Energy Technology) и др. – ведутся в США с начала 2000-х годов. Целью этих программ является разработка демонстрационных высокоэффективных узлов, газогенераторов, двигателей и систем для силовых установок летательных аппаратов военного назначения с характеристиками, существенно превосходящими характеристики двигателей пятого поколения [3].

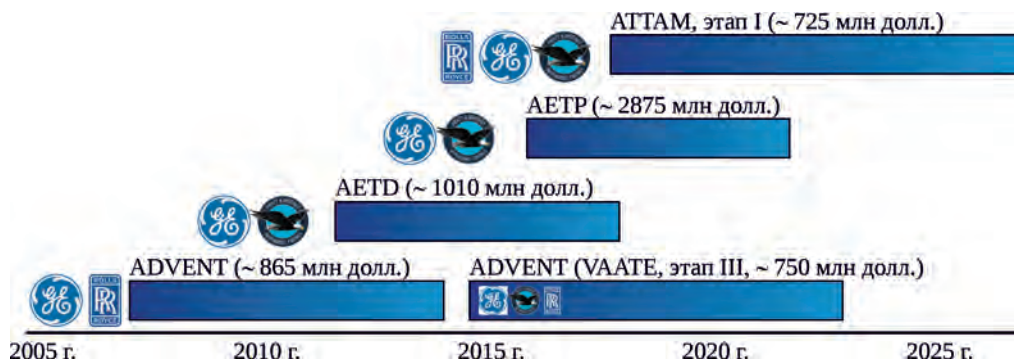


Рис. 6. Программы разработки критических технологий адаптивного двигателя

В конструкции двигателей шестого поколения найдут широкое применение новые технические решения и перспективные конструкционные материалы, прежде всего композиционные. Предполагается, что благодаря их внедрению отношение тяги к весу двигателей военного назначения будет больше в 2...2,5 раза, чем у ТРДДФ F119-PW-100 [3; 4; 46].

Концептуальное исследование летательных аппаратов шестого поколения, проведенное ВВС США совместно с компаниями General Electric, Rolls-Royce, Boeing, Lockheed Martin и Northrop Grumman, показало, что в их силовых установках целесообразно применение адаптивных двигателей [3; 4].

Адаптивные двигатели используют ряд регулируемых устройств для изменения степени повышения давления вентилятора и степени двухконтурности – двух ключевых параметров, влияющих на удельный расход топлива и тягу.

Создание адаптивного двигателя позволит значительно улучшить топливную эффективность, что по значимости будет сравнимо с переходом от ТРД к ТРДД. Благодаря регулированию узлов в широком диапазоне адаптивный двигатель позволяет обеспечить низкий удельный расход топлива в условиях крейсерского полета с дозвуковой скоростью, свойственный двигателям с большой степенью двухконтурности, и большую удельную тягу на режимах максимальной тяги, свойственную двигателям с малой степенью двухконтурности [3; 4].

С 2007 г. Научно-исследовательская лаборатория ВВС США (НИЛ ВВС США) совместно с другими научно-исследовательскими организациями министерства обороны организовала ряд последовательных программ, в рамках которых разрабатываются технологии адаптивного двигателя. Программы разработки адаптивных двигателей с указанием основных участников и объема финансирования показаны на рис. 6 [4].

Первой из них стала программа VAATE, в рамках которой для нескольких перспективных авиационных комплексов ВВС США продолжалась доработка ряда технологий, разработанных по программе ИНРТЕТ (Integrated High Performance Turbine Engine Technology),

до уровня технологической готовности, позволяющего их применять в серийных двигателях для летательных аппаратов различного назначения (TRL \geq 6) [3; 4].

В частности, по проектам HEETE (Highly Efficient Embedded Turbine Engine) II этапа и ADVENT (Adaptive Versatile Engine Technology) (2007...2013 годы) компании General Electric и Rolls-Royce разрабатывали технологии для адаптивных двигателей взлетной тягой 89...156 кН. Работы завершились испытаниями компрессоров с высокой степенью повышения давления и демонстрационных газогенераторов [3].

Революционные технологии, разработанные в рамках программы VAATE, при их интеграции позволяют создать двигатели для силовых установок летательных аппаратов различного назначения, обладающих характеристиками и показателями очень высокого уровня (рис. 7) [3; 47].

С 2012 г. компании General Electric и Pratt & Whitney работали по программе AETD, которая завершилась в 2018 г. стендовыми испытаниями демонстрационного газогенератора (General Electric) и адаптивного вентилятора (Pratt & Whitney) [4; 48; 49].

Продолжением AETD стала программа AETP, которая должна подготовить почву для создания адаптивного двигателя взлетной тягой 200 кН для перспективного истребителя шестого поколения, а также для возможного переоснащения самолета F-35 в 2020-х годах. AETP направлена на усовершенствование технологий адаптивного двигателя и снижение рисков при подготовке к началу ОКР [4].

Проект ADVENT. Особое место в реализации технологий программы VAATE занимает проект ADVENT, цель которого состояла в разработке и экспериментальной проверке критических технологий адаптивного двигателя взлетной тягой 89...156 кН, который мог бы найти применение в силовой установке бомбардировщика нового поколения [3].

Основная задача проекта заключалась в уменьшении удельного расхода топлива на ~ 25% в условиях дозвукового крейсерского полета по сравнению с расходом топлива ТРДД F118, применяемого в составе

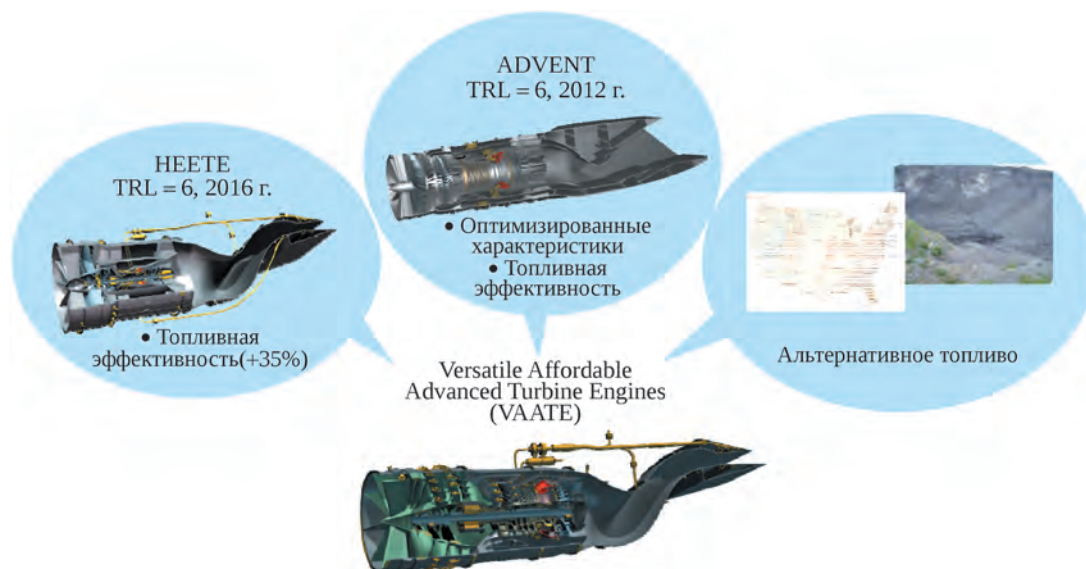


Рис. 7. Применение технологий из программы VAATE для создания адаптивных двигателей [47]

силовой установки бомбардировщика В-2 компании Northrop Grumman. Снижение удельного расхода топлива должен был обеспечить адаптивный двигатель с высоким термическим КПД за счет увеличения значений суммарной степени повышения давления в компрессорах и температуры газа на входе в ТВД.

Выбор компании General Electric в качестве одного из основных участников работ по проекту был обусловлен тем, что она была безусловным лидером в разработке двигателей изменяемого цикла (ДИЦ, VCE – variable cycle engine) и имела уникальный опыт применения общего газогенератора для двигателей дозвуковых и сверхзвуковых самолетов (что и требовалось НИЛ ВВС США).

С конца 1970-х годов General Electric в рамках программ NASA разрабатывала двигатель для сверхзвукового пассажирского самолета с адаптивным двухкаскадным вентилятором. Для удовлетворения требований к характеристикам двигателя на дозвуковой и сверхзвуковой скорости полета в нем применялись регулируемые узлы: направляющие аппараты каскадов вентилятора, клапан перепуска за вторым каскадом вентилятора, сопловой аппарат (СА) турбины низкого да-

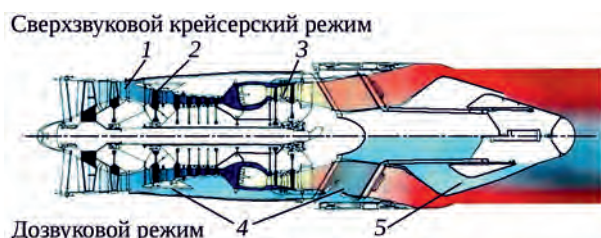


Рис. 8. Схема двигателя VCE компании General Electric [50]:
 1 – вентиляторная ступень; 2 – вентиляторная ступень на одном валу с КВД; 3 – регулируемые лопатки СА ТНД; 4 – регулируемые перепускные каналы; 5 – кольцевое акустическое сопло

вления (ТНД), смеситель и критические сечения сопел наружного и внутреннего контуров (рис. 8) [4; 50].

Результаты успешных испытаний двигателя-демонстратора YJ101 были использованы при разработке двигателя GE21 для сверхзвукового пассажирского самолета с крейсерской скоростью полета, соответствующей числу $M_n = 2,4$. В дальнейшем компания General Electric продолжила свои работы в рамках программ ИРТЕТ (ДИЦ), ATF – Advanced Tactical Fighter (ТРДДФ F120) и JSF (ТРДДФ F136).

Опыт создания двигателей на основе базового газогенератора был получен компанией в 1970–1980-е годы, когда она на базе газогенератора ТРДДФ F101, применяемого в составе силовой установки бомбардировщика В-1В, разработала ТРДДФ F110 для истребителей F-15/F-16, ТРДД F118 для бомбардировщика В-2 и совместно с компанией Snecma (ныне Safran Aircraft Engines) – семейство ТРДД CFM56 для магистральных пассажирских самолетов [3].

Выбор компании Rolls-Royce в качестве второго участника проекта ADVENT был связан с переходом к ней работ по ДИЦ после приобретения в 1995 г. компании Allison Engine, которая в рамках программ ИРТЕТ и ATF совместно с General Electric принимала участие в создании ДИЦ и ТРДДФ XF120/YF120/F120. Также на выбор повлияло участие в работах по ТРДДФ F136 в рамках программы JSF [3].

Участниками проекта были созданы и испытаны критические узлы и демонстрационные газогенераторы и двигатели.

При создании демонстрационных газогенератора и двигателя компания General Electric использовала технологии, разработанные по программам Министерства обороны США (ИРТЕТ, ATF, VAATE, JSF) и программам TECH56/LEAP56 (семейств ТРДД

CFM56/LEAP). Из-за более высокой температуры газа на входе в ТВД в ней применялись лопатки СА из керамического композиционного материала (ККМ).

В ходе испытаний демонстрационного газогенератора (октябрь 2012 – февраль 2013 г.) были одновременно достигнуты самые высокие в истории авиации значения температуры воздуха (газа) на выходе из компрессора и на входе в турбину [3].

В конце 2013 – начале 2014 г. компания General Electric провела испытания демонстрационного двигателя, результаты которых подтвердили возможности адаптивной технологии по уменьшению удельного расхода топлива на ~25% в условиях дозвукового крейсерского полета и увеличению хладоресурса для улучшения системы теплового регулирования [3; 4].

Компания Rolls-Royce при создании объектов в проекте ADVENT использовала технологии, разработанные по программам Министерства обороны США (INPTET, VAATE, JSF) и собственным программам создания HT3. В рамках проекта компания осуществила разработку и провела испытания адаптивного вентилятора (2009 г.) и демонстрационного газогенератора (2012 г.). Также ею был разработан демонстрационный двигатель, испытания которого были запланированы на 2013 г., но информация о его испытаниях не встречалась [3; 4].

В 2015 г. в рамках III этапа программы VAATE работы по проекту ADVENT были продолжены с целью доведения разработанных ранее технологий до необходимого уровня готовности. При этом количество участников было увеличено – к проекту присоединилась компания Pratt & Whitney [51].

Программа AETD. Проект ADVENT проложил дорогу программе AETD, участниками которой стали компании General Electric и Pratt & Whitney, а компания Rolls-Royce проиграла конкурс.

В отличие от проекта ADVENT программа AETD была нацелена на разработку для силовой установки сверхзвукового ударного самолета шестого поколения технологий адаптивного двигателя взлетной тягой 200 кН, обеспечивающего уменьшение удельного расхода топлива на ~25% и увеличение тяги на ~5...10% в различных условиях полета по сравнению с ТРДДФ F135. Таким образом, программа AETD предъявляла к двигателю более жесткие требования и предполагала создание газогенератора большей размерности, чем в проекте ADVENT. Кроме того, рассматривалась возможность замены двигателя в силовых установках самолетов F-35 на новый двигатель в середине 2020-х годов [52–55].

Участники программы должны были разработать технологии для критических узлов нового двигателя, провести их испытания и интегрировать в демонстрационные газогенераторы или двигатели [4].

Проведя анализ предъявляемых требований и результатов стендовых испытаний газогенератора по проекту ADVENT, компания General Electric пришла к выводу, что адаптивный двигатель для истребителя шестого поколения должен иметь адаптивный вентилятор и третий контур, который можно перекрывать (закрывать) для уменьшения степени двухконтурности, увеличивая таким образом тягу, и открывать для повышения степени двухконтурности, чтобы уменьшить расход топлива и сопротивление воздухозаборника по жидкой линии тока в условиях сверхзвукового крейсерского полета. Применение таких узлов позволяет изменять в широком диапазоне степень двухконтурности и степень повышения давления в компрессорах двигателя.

Несмотря на рост тяги при переходе от двигателя для дозвукового к двигателю для сверхзвукового самолета, размерность газогенератора в программе AETD не сильно изменилась, так как ее определяла потребная тяга на сверхзвуковых режимах полета. При переходе к новому поколению истребителей размерность газогенератора, возможно, потребует скорректировать, если будет выбрана двухдвигательная схема самолета.

Внешне адаптивный двигатель компании General Electric в программе AETD напоминал ТРДДФ F136, но представлял собой «конструкцию с чистого листа».

В трехступенчатый вентилятор были внесены существенные изменения, так как он предусматривает возможность изменения геометрии и адаптивные функции.

КВД по конструкции был аналогичен КВД семейства ТРДД LEAP, но имел меньшее количество ступеней. Следует отметить, что в начале 2000-х годов в рамках программы LEAP56 компания изготовила и испытала газогенератор, в котором шестиступенчатый компрессор имел степень повышения давления $\pi_k^* \approx 20$ [3].

В связи с более высокими давлением и температурой по тракту газогенератора по сравнению с ТРДДФ F136 в конструкцию камеры сгорания и турбины были внесены значительные изменения и применены ККМ.

Одним из наиболее значимых своих достижений компания считает широкое применение в адаптивном двигателе полимерных и керамических композиционных материалов. Если в ТРДДФ F136 из ККМ были изготовлены только лопатки СА второй ступени ТНД, то в адаптивном двигателе ККМ применяются для жаровой трубы камеры сгорания, лопаток ТВД и ТНД. Применение ККМ для рабочих лопаток ТНД было успешно проверено при испытании ТНД ТРДДФ F414 в конце 2014 г. [56].

Кроме того, для обеспечения необходимого теплового состояния деталей конструкции двигателя в третий контур были установлены теплообменники системы теплового регулирования.

В рамках программы AETD до начала испытаний демонстрационного газогенератора компания General Electric провела в 2013...2016 годах испытания модельного адаптивного вентилятора, натурного компрессора, двух новых отсеков и натурной камеры сгорания, третьего контура, теплообменников, форсажной камеры с трехконтурным соплом, подшипников и механических систем. Свое участие в программе AETD компания завершила испытаниями нового демонстрационного газогенератора адаптивного двигателя в 2018 г. [48; 57; 58].

Компания Pratt & Whitney не принимала участия в проекте ADVENT, поэтому до начала программы AETD вела работы по адаптивному двигателю за свой счет. В этих работах основное внимание уделялось разработке технологий адаптивного вентилятора и компрессора с высокой степенью повышения давления, которые компания продолжала разрабатывать и в рамках новой программы.

Как участник программы AETD компания Pratt & Whitney разработала и испытала новый газогенератор с высокой степенью повышения давления, созданный на базе газогенератора F135. Затем последовали испытания натурного вентилятора для трехконтурного адаптивного двигателя и испытания форсажной камеры совместно с соплом. Участие Pratt & Whitney в программе AETD завершилось испытаниями в 2017 г. адаптивного

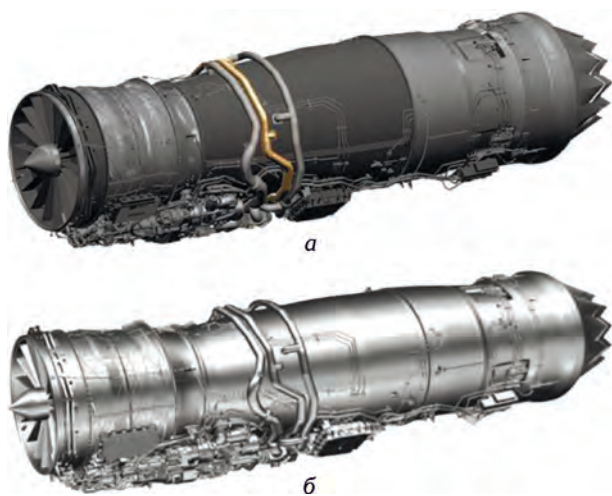


Рис. 9. Демонстрационные адаптивные трехконтурные двигатели компаний General Electric (а) и Pratt & Whitney (б) [48; 49]



Рис. 10. Трехконтурный двигатель компании General Electric в разрезе [59]

трехконтурного вентилятора в составе демонстрационного двигателя, созданного на базе значительно модифицированного газогенератора ТРДДФ F135. По информации представителей компании, вентилятор удовлетворил требованиям и даже превзошел ожидания в отношении заявленных характеристик и его совместимости с узлами F135 [49; 57; 58].

Программа AETP. Adaptive Engine Transition Program стоит последней в серии крупных программ, поддерживаемых НИЛ ВВС США с целью отработки критических технологий адаптивного двигателя для АК фронтовой авиации шестого поколения и находящихся в эксплуатации. О ее начале ВВС США объявили в июле 2016 г., а участниками работ стали компании General Electric и Pratt & Whitney. Компании получили по 1 млрд долл. на доведение технологий и производственных процессов до уровня готовности $TRL \geq 6$ и $MRL \geq 6$ соответственно и создание к 2021 г. прототипов адаптивного двигателя для проведения стендовых (включая высотные) и летных испытаний. Двигатель компании General Electric получил обозначение XA100, двигатель компании Pratt & Whitney – XA101 (рис. 9) [48; 49].

В основу разработки XA100 была положена схема трехконтурного ТРДДФ с адаптивным вентилятором, запатентованная компанией General Electric в 2006 г. На рис. 10 показан такой двигатель в разрезе [59].

Планируемые улучшения тактико-технических характеристик самолетов фронтовой авиации при применении технологий, разработанных по программе AETP, показаны на рис. 11 [58; 60].

В 2018 г. финансирование по программе AETP для ее участников было увеличено на ~874 млн долл. с целью проведения работ по уменьшению риска применения технологий адаптивного двигателя при переходе к этапу ОКР.

В начале 2019 г. состоялась защита рабочих проектов, после чего компании приступили к изготовлению прототипов адаптивных двигателей. Если в начале программы предполагалось изготовление каждой компанией трех прототипов для проведения стендовых и летных испытаний, то сейчас они должны изготовить только по два двигателя для проведения стендовых испытаний [57].

Испытания прототипов адаптивных двигателей запланированы на 2021 г., а завершение работ по программе – на 2022 г. По результатам испытаний будет принято решение, с кем из двух участников работ будет заключен контракт на проведение ОКР по адаптивному двигателю для перспективных авиационных комплексов шестого поколения [57].

Что касается применения адаптивного двигателя в силовых установках самолетов семейства F-35,



Рис. 11. Возможные улучшения характеристик самолетов фронтовой авиации при применении технологий, разработанных по программе АЕТР [60]

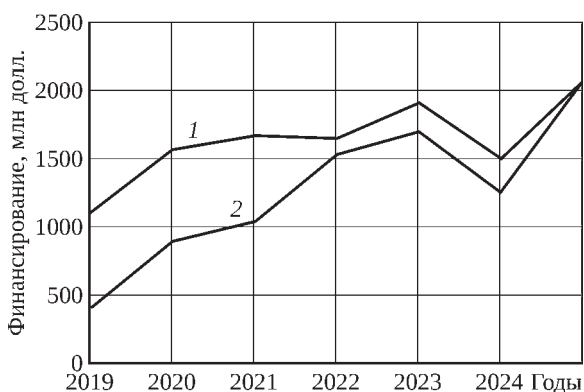


Рис. 12. Финансирование работ по программам создания адаптивного двигателя (1) и АК фронтовой авиации шестого поколения (2) [63]

то компания Pratt & Whitney относится к этому скептически. По ее мнению, адаптивный двигатель может подойти только для силовой установки самолета F-35A с обычным взлетом и посадкой (ОВП). Для силовой установки самолета короткого взлета и вертикальной посадки F-35B такой двигатель неприемлем, а его применение на самолете палубного базирования (ПБ) F-35C потребует существенного изменения конструкции самолета и двигателя [61].

Работы по программе АЕТР тесно связаны с работами по программе NGAD, в рамках которой построен летный образец, совершивший первый полет в сентябре 2020 г. [44; 62]. Финансирование работ по программам АЕТР и NGAD показано на рис. 12 [63].

Работы по авиационным комплексам шестого поколения в Европе

Появление программ создания нового европейского авиационного комплекса обусловлено стремлением Европы обрести независимость от США в оборонной и космической областях, что вызвано охлаждением отношений между США и Евросоюзом в последние годы.

В 1980-е годы Франция, Великобритания, Германия, Италия и Испания уже предпринимали попытку создания единого европейского истребителя, но из-за разногласий между участниками работ и различий в требованиях к самолету она не увенчалась успехом. В результате в Европе было создано два многофункциональных истребителя: Rafale компании Dassault Aviation для ВВС и ВМС Франции и Турпоон консорциума Eurofighter International для ВВС Великобритании, Германии, Италии и Испании, чьи компании вошли в его состав. Эксплуатация самолетов Rafale началась в 2001 г., а Турпоон – в 2003 г. [64].

Созданные истребители по своим характеристикам занимали промежуточное положение между четвертым и пятым поколениями. Причем Турпоон, как отмечалось выше, наиболее близок по характеристикам к истребителю пятого поколения.

После принятия на вооружение истребителей Rafale и Турпоон в европейских странах были развернуты работы по созданию БПЛА (nEUROn, Taranis, Batacuda), быстро совершенствовались системы проти-

вовоздушной обороны, появились новые виды авиационного вооружения – все это поставило ведущие страны Европы перед необходимостью создания нового авиационного комплекса.

В 2012 г. ВВС Германии поставили вопрос о замене истребителя-бомбардировщика Tornado на двухместный истребитель с низким уровнем заметности для выполнения ударных задач, в том числе с применением БПЛА. Контракт на разработку был заключен с компанией Airbus, а программа, в рамках которой разрабатывался новый авиационный комплекс, получила название Next Generation Weapon System (NGWS). Поняв к 2014 году невозможность создания перспективного самолета в одиночку, Германия начала поиск альтернативных вариантов. Модернизация истребителя Turboprop и приобретение F-35 были признаны неприемлемыми, и Германия вновь обратилась к европейским партнерам с предложением о создании общеевропейского перспективного АК шестого поколения [65].

В 2012 г. компании Dassault Aviation и BAE Systems, проводившие работы по БПЛА nEUROn и Taranis, в рамках программы Future Combat Air System (FCAS) объединились для создания перспективных БПЛА, которые по своим характеристикам ничем не должны были уступать пилотируемым самолетам. Однако подход к пилотируемым летательным аппаратам у компаний был разным: Dassault считала, что для управления перспективными БПЛА подойдут истребители поколения 4+, а BAE настаивала на разработке истребителя нового поколения, обладающего низким уровнем заметности. В Великобритании, которая являлась основным партнером компании Lockheed Martin по программе JSF и планировала закупку истребителей пятого поколения F-35, новый истребитель получил название «истребитель шестого поколения», хотя конкретных требований к нему не было [65].

В 2016 г. Германия начала переговоры с Францией об участии в программе FCAS. И хотя франко-британская программа была призвана создать замену истребителям Rafale и Turboprop, Германия решила принять в ней участие, чтобы на основе базового самолета создать двухместный вариант под свои задачи.

Инициировав процедуру выхода из Европейского союза, Великобритания стала добиваться полной автономности своих оборонных программ. В 2017 г. было приостановлено ее участие в программе FCAS, участниками которой остались Франция и Германия.

В 2018 г. Великобритания заявила, что для разработки перспективного истребителя и БПЛА, которые станут одним комплексом, открывает программу Tempest и создает для этого собственное объединение европейских компаний Team Tempest [65; 66].

Программа Tempest. В июле 2018 г. на аэрокосмическом салоне Farnborough Air Show 2018 как часть АК шестого поколения был представлен макет истребителя Tempest, создаваемого в рамках инициативы Future Combat Air System Technology Initiative (FCAS TI), являющейся частью британской стратегии Combat Air Strategy [67].

Для создания АК шестого поколения компания BAE Systems, которая была инициатором работ, образовала консорциум Team Tempest, в состав которого, кроме нее, в 2019...2020 годах вошли компании из Великобритании (Rolls-Royce, MBDA, GE UK, GKN, Collins Aerospace, Martin Baker, QinetiQ, Bombardier UK, Thales UK), Швеции (SAAB) и Италии (Leonardo), а также управление RAF Rapid Capabilities Office Министерства обороны Великобритании. В 2020 г. в консорциуме работало 1800 человек, в 2021 г. его численность планируется увеличить до 2500 человек. Всего в работах консорциума, кроме основных партнеров, принимают участие около 300 компаний, занятых в разных отраслях промышленности [24; 67; 68].

Консорциум Team Tempest объединяет ведущих мировых производителей авиационной техники в четырех ключевых технологических областях: перспективные системы боевой авиации и их интеграция (BAE Systems); перспективные силовые установки и система энергообеспечения (Rolls-Royce); перспективные датчики, электроника и авионика (Leonardo) и перспективные системы вооружения (MBDA) [69].

На программу правительство Великобритании выделило 2 млрд фунтов стерлингов (почти 2,6 млрд долл.). Ожидается, что первые прототипы истребителя шестого поколения будут изготовлены в 2026 г. [24].

В декабре 2020 г. Италией, Швецией и Великобританией был подписан трехсторонний меморандум о взаимопонимании, в котором определены общие принципы сотрудничества на равной основе между компаниями трех стран [24].

Tempest – это истребитель с низким уровнем заметности, который должен поступить на вооружение в 2035 г. и заменить самолеты Turboprop в ВВС Великобритании в качестве доступной, гибкой, обновляемой (модернизируемой) военной платформы, предназначенной также на экспорт.

Работы по программе находятся на этапе концептуального проектирования, поэтому информации о большей части технологий, которые будут применяться в Tempest, мало. Однако известно, что разрабатываемый истребитель сможет осуществлять полеты как в беспилотном, так и в пилотируемом (опционально) режиме и будет включать в себя ряд перспективных технологий (рис. 13) [24; 66; 67]:



Рис. 13. Авиационный комплекс шестого поколения, разрабатываемый в рамках программы Tempest [66]

Вентилятор

- Перспективные легкие высокотемпературные КМ
- Регулируемый перепуск воздуха в третий контур
- Оптимизированная аэродинамика

Энергообеспечение и тепловое регулирование

- Интеллектуальное управление энергообеспечением
- «Более электрические» технологии
- Интеллектуальное управление двигателем
- Полностью интегрированная система теплового регулирования

Двигатель

- Легкий высокотемпературный газогенератор
- Высокоэффективная камера сгорания
- Высокотемпературная турбина
- Перспективные материалы и технологии производства

Выходное устройство

- Перспективные материалы
- Повышенная эффективность форсажной камеры
- Перспективная конструкция сопла и интеграция с силовой установкой

Вентилятор, устойчивый к большой неравномерности потока



Встроенный стартер-генератор



Повышение информативности

- Интеллектуальное управление мощностью
- Динамическая система управления техническим состоянием

Перспективные КМ и аддитивные технологии

- Легкие, высокотемпературные материалы с низким удельным весом



Полностью интегрированная система теплового регулирования

Рис. 14. Основные критические технологии двигателя для силовой установки истребителя шестого поколения Tempest [70]

- технологии, обеспечивающие низкий уровень заметности;
- управление роем БПЛА;
- применение оружия направленной энергии, а также гиперзвукового оружия;
- возможность взаимодействия с другими платформами, подразумевающую обмен информацией в защищенном информационном пространстве для координации боевых действий или организации обороны (cooperative engagement capability);
- виртуальную кабину, отображаемую на дисплее, установленном на шлеме пилота;
- адаптивный двигатель;
- системы энергообеспечения и теплового регулирования.

Кроме того, известно, что в настоящее время ведутся работы по созданию не менее 60 демонстраторов технологий. В декабре 2019 г. компания Leonardo сообщила, что в лабораторных условиях провела экспериментальные исследования приемника радиолокационных предупреждений, точность которого в четыре раза выше, чем у существующих датчиков. В январе 2020 г. компания Rolls-Royce заявила, что разрабатывает интегрированный стартер-генератор, который должен заменить тяжелую коробку двигательных агрегатов [67]. Основные критические технологии по двигателю и силовой установке самолета Tempest показаны на рис. 14 и рис. 15 [70; 71].

Определенные успехи достигнуты в разработке концепции открытой архитектуры (она получила

название PIRAMID), основу которой составляет программное обеспечение (новая операционная система и комплекты программного обеспечения), позволяющее взаимодействовать с другими летательными аппаратами, входящими в состав боевой группы [67].

Для сокращения стоимости и продолжительности работ при создании истребителя Tempest будет применяться системный инжиниринг на основе цифрового двойника, позволяющий в одно и то же время проводить проектирование и оценивать (виртуально испытывать) то, что сделано. Такую систему применяла компания SAAB при создании собственного истребителя Gripen и совместного с компанией Boeing учебно-тренировочного самолета T-7A [67].

Создание цифрового двойника позволит цифровой модели сопровождать физический самолет на протяжении всего жизненного цикла и обеспечит возможность быстрой модификации, модернизации и записи изменений. Однако при этом возникает проблема «виртуальной сертификации», которая требует времени на решение [67].

Сроки создания истребителя Tempest планируется сократить почти вдвое, что приведет и к снижению затрат. Кроме того, при его создании будут применяться новые модели сотрудничества, предполагающие изменение традиционных подходов к передаче и приобретению технологий.

Партнеры по консорциуму Team Tempest пытаются создать гибкую систему организации работ, которая позволит им получить максимальную выгоду от разра-

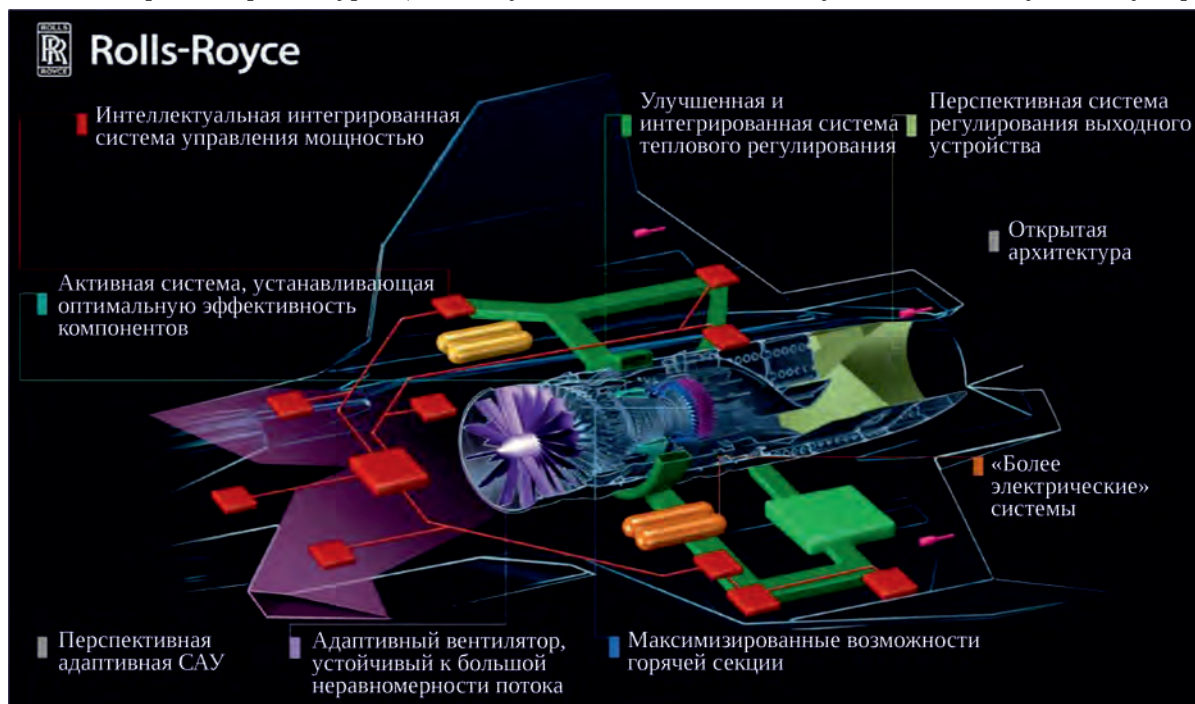


Рис. 15. Основные критические технологии силовой установки истребителя шестого поколения Tempest [71]

ботанных технологий или даже отказаться от части работ, в которых они не желают принимать участие. На разных этапах (НИОКР, производство, приобретение, эксплуатация), на протяжении всего жизненного цикла самолета, в программу Tempest могут привлекаться партнеры с разной степенью участия. Это делает программу более сложной, но расширяет возможности для стран и компаний [67].

В январе 2021 г. появилось сообщение о том, что компания Spirit Aero Systems (Северная Ирландия) в рамках трехлетнего контракта стоимостью 30 млн фунтов стерлингов разработает и изготовит для ВВС Великобритании прототип беспилотного истребителя, известного как Light Affordable New Combat Aircraft (LANCA). Он будет обладать высокой скоростью полета и возможностью взаимодействовать с пилотируемыми самолетами и БПЛА. На истребителе-прототипе будут применяться новые виды вооружения для ведения воздушного боя, средства наблюдения и обнаружения целей, ведения радиоэлектронной борьбы и подавления ПВО противника. Такие самолеты в рамках программы Tempest получили название «лояльные ведомые» (loyal wingman), они станут первыми в Великобритании беспилотными платформами, способными вести борьбу с самолетами противника и защищаться от ракет класса «земля – воздух». Ожидается, что полномасштабная программа летных испытаний начнется в конце 2023 г. [72].

Программа Tempest поможет определить долгосрочную перспективу для авиационной промышленности Великобритании, а выделенные средства позволят разработать необходимый набор технологий, которые и лягут в основу нового самолета. Однако ряд британских экспертов сомневаются в возможности Великобритании самостоятельно разработать истребитель шестого поколения, принимая во внимание недавний серьезный экономический кризис и состояние технологической базы страны [65].

Программа FCAS. Решение о совместной разработке европейской системы ПВО нового поколения было принято руководителями Франции и Германии в июле 2017 г. Во время проведения авиасалона ILA Berlin Air Show 2018 министры обороны обеих стран подписали документ – High Level Common Operational Requirements Document, – определяющий общие требования к системе вооружения нового поколения (NGWS) в рамках программы FCAS. Параллельно с этим компании Dassault Aviation и Airbus договорились о широкомасштабном отраслевом сотрудничестве для совместного руководства этой программой, которая является самой крупной и технологически сложной европейской оборонной инициативой [22; 73].

Компании Airbus и Dassault Aviation стали главными исполнителями программы FCAS, заключив

в феврале 2019 г. с правительствами Германии и Франции контракты на проведение работ. В июне 2019 г. к данному проекту присоединилась Испания, которая проявляет интерес к замене собственных F-18. Согласно подписанному меморандуму, к 2040 году должны быть завершены все работы по программе FCAS, а в начале 2040-х годов – начато серийное производство ее компонентов (рис. 16) [75; 76].

Результатом работ по программе FCAS должна стать оперативная сеть из существующих и новых платформ, состав которой может меняться в зависимости от поставленной боевой задачи (рис. 17) [22; 23; 74]. Ядром сети FCAS станет так называемое боевое облако (Air Combat Cloud, ACC), заимствованное из предшествующей немецкой программы NGWS. В состав ACC входит перспективный истребитель (Next Generation Fighter, NGF) и БПЛА (Remote Carriers, RC) разного назначения, связанные между собой защищенным информационным пространством. Сеть FCAS, в состав которой может входить несколько боевых групп, также будет связана защищенным информационным пространством с другими воздушными, морскими, космическими и наземными платформами военного назначения.

Истребитель шестого поколения, созданный в рамках программы FCAS, в 2040-х годах должен заменить в европейских странах устаревающие истребители Rafale, Typhoon и F-18. Его можно рассматривать и как альтернативу американским истребителям F-35. Сегодня страны Европы, не имея самолетов пятого поколения собственного производства, вынуждены закупать их у США.

Двухместный экипаж нового истребителя будет представлен пилотом и оператором БПЛА. На БПЛА будет приходиться основной удар средств ПВО противника, тогда как пилот и оператор будут наблюдать за боем из кабины истребителя на безопасном расстоянии. Самолет получит способность действовать на высоте, недостижимой для всех существующих и перспективных средств ПВО.

В феврале 2019 г. компании Safran и MTU Aero Engines подписали соглашение о сотрудничестве с целью разработки и производства двигателя для истребителя, создаваемого в рамках программы FCAS [77; 78]. Работы между двигателестроительными компаниями распределены следующим образом: Safran отвечает за разработку горячей части двигателя и его интеграцию, а MTU Aero Engines – за разработку холодной части, техническое обслуживание и ремонт. К программе могут присоединиться и другие европейские компании. Двигатель для истребителя нового поколения должен обеспечивать сверхзвуковой полет и полет на низкой крейсерской скорости в течение длительного времени.



Рис. 16. План-график работ по программе FCAS [76]



Рис. 17. Структура авиационного комплекса шестого поколения, разрабатываемого в рамках программы FCAS [22]

Разработчики	Истребитель	Двигатель	БПЛА и БАС	«Боевое облако»	Моделирование	Датчики	Заметность
Головной исполнитель	◆ Dassault Aviation	◆ Safran Aircraft Engines	◆ Airbus	◆ Airbus	Все головные исполнители	◆ Indra Sistemas	◆ Airbus
Соисполнители	◆ Airbus	◆ MTU Aero Engines	◆ MBDA	◆ Thales Group	◆ Airbus	◆ FCMS	◆ Airbus
◆ Франция	◆ Airbus	◆ ITP Aero	◆ MBDA	◆ Indra Sistemas	◆ Dassault Aviation	◆ Thales Group	◆ Dassault Aviation
◆ Германия			◆ Satnus		◆ Indra Sistemas		
◆ Испания							

Рис. 18. Распределение работ между участниками программы FCAS [81]

Несмотря на бóльшую компактность и меньшую массу, чем у двигателя истребителя Rafale, тяга нового двигателя на режиме полного форсажа будет более 133,5 кН и позволит истребителю нести больше вооружения [79].

В двигатель нового поколения будет внедрено множество перспективных технологий, которые обеспечат низкий уровень заметности и шума и высокий уровень температуры газа на входе в ТВД (более 1800°C). Двигатель должен быть адаптивным, с изменяемой степенью двухконтурности и иметь сопло с управлением вектором тяги. Кроме того, в нем найдут применение перспективные технологии, обеспечивающие выработку и распределение необходимой электроэнергии на борту и тепловое регулирование.

К 2025 году планируется завершить разработку демонстрационного двигателя на базе ТРДДФ М88, которым будет оснащен первый опытный самолет FCAS. Испытания двигателя запланированы на 2026 г. Для проведения научно-исследовательских работ по двигателю шестого поколения Агентство оборонных закупок Франции выделило компании Safran 115 млн евро на пять лет [77; 78].

Контракт на проведение исследований с целью определения общей концепции истребителя шестого поколения (Joint Concept Study) был заключен с партнерами по программе FCAS в начале 2019 года [23]. В феврале 2020 г. правительства Франции и Германии заключили рамочный контракт с компаниями Dassault Aviation, Airbus, Safran, MTU Aero Engines, MBDA и Thales на создание демонстраторов технологий для истребителя FCAS (этап 1А) [80]. Контракт продолжительностью 18 месяцев предусматривает разработку демонстраторов и отработку критических технологий с целью начать их летные испытания в 2026 году.

Распределение работ между участниками программы FCAS на этапе 1А показано на рис. 18 [81].

Работы на этапе 1А ведутся по следующим направлениям:

- истребитель следующего поколения (Next Generation Fighter)
- удаленные беспилотные системы (Unmanned Systems Remote Carrier);
- воздушная боевая группа (Air Combat Cloud);
- двигатель (Engine).

Согласованность между демонстраторами технологий обеспечит среда моделирования, которую совместно разработают компании-участники.

Несмотря на различия в программах Tempest и FCAS, европейские эксперты предполагают их объединение в будущем, учитывая, что на развитие программ потребуются огромные средства [82]. В целом эксперты скептически относятся к планам европейских производителей, считая, что европейский истребитель шестого поколения по затратам на разработку и создание вполне может побить рекорд F-35. Кроме того, невозможно спрогнозировать, какой будет технологическая среда в 2040-х годах, сохранится ли боевая пилотируемая авиация в современном виде или же серьезный толчок к развитию получит беспилотная авиация. Идею перехода к шестому поколению, минуя пятое, нельзя считать очень хорошей. Однако промышленности эти программы принесут очевидную пользу и колоссальные доходы [77].

Заключение

Проводимые в настоящее время министерствами обороны США, Франции и Германии научно-исследовательские работы направлены на то, чтобы обеспечить вооруженным силам стран – участников работ глобальное военное превосходство до середины XXI века, предоставив им соответствующую боевую технику по доступной цене.

Литература / Reference

1. GE 2019 annual report / General Electric. 2020. 6, form 10-K 127, [3] p.
2. Rolls-Royce plc 2019 annual report / Rolls-Royce plc. 2020. 180 p.
3. 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. Солониной. М. : ЦИАМ, 2010. 676, [4] с.
Skibin V.A., Solonin V.I., Palkin V.A. Raboty vedushchikh aviadvigatelistroitel'nykh kompanii v obespechenie sozdaniia perspektivnykh aviatsionnykh dvigatelei (analiticheskii obzor) [Works of leading aero engine companies to ensure creation of advanced aero engines (analytical review)] under general editorship of V.A. Skibin and V.I. Solonin. Moscow: CIAM, 2010. 676, [4] p.
4. Солонин В.И., Палкин В.А., Игумнова А.С. Разработка в США принципиально новых технологий для двигателей 6-го поколения боевой авиации : аналитический обзор № 584 / Центр. ин-т авиац. моторостроения им. П.И. Баранова. М. : ЦИАМ, 2018. 77 с.
Solonin V.I., Palkin V.A., Igumnova A.S. Razrabotka v SShA printsipial'no novykh tekhnologii dlia dvigatelei 6-go pokoleniia boevoi aviatsii [Development of fundamentally new technologies for engines of the 6th generation of combat aviation in the USA]. Analytical review no. 584. Moscow: CIAM, 2018. 77 p.
5. Перспективы рынка истребителей в ожидании 5-го поколения // Авиация России. URL: <https://aviation21.ru/perspektivy-rynka-istrebitelej-v-ozhidanii-5-go-pokoleniya/>. Дата публ.: 15.08.2017.
Perspektivy rynka istrebitelei v ozhidanii 5-go pokoleniia [Prospects for the fighter aircraft market in anticipation of the 5th generation]. Aviation of Russia. URL: <https://aviation21.ru/perspektivy-rynka-istrebitelej-v-ozhidanii-5-go-pokoleniya>. Date of publication: 15.08.2017.
6. Advanced Tactical Fighter // Wikipedia : the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Tactical_Fighter.
7. World Air Forces 2019. Flight International, 2019. 34 p.
8. Cancian M.F. U.S. Military Forces in FY 2021 : Air Force : December 2020 / Center for Strategic & International Studies. 2020. 18 p.
9. Fleet Statistics : data correct as of April 13, 2020 / CFM International // CFM : The power of flight : site. Section "Engines". URL: <https://www.cfmaeroengines.com/engines/fleet-statistics/>.
10. Mathis T. GE Aviation : Cowen investor meeting, November 3, 2020 : presentation. 11 p. URL: <https://www.ge.com/investor-relations/events-reports/cowen-virtual-investor-meeting>.
11. Thompson J. The jet engine in U.S. Military : 24 Oct 03 : presentation / OC-ALC/LP, Tinker AFB. 2003. 45 p.
12. F100-PW-229. Engine Enhancement Package : The engine of choice for today's F-15 and F-16 : presentation / United Technologies Corporation, Pratt & Whitney. 2013. 4 p. Military Engines.
13. F-35 Joint Strike Fighter (JSF) Program : updated May 27, 2020 / Congressional Research Service. 2020. 41 p. (CRS report ; RL30563).
14. Bolkcom C. F-22A Raptor : March 5, 2009 / Congressional Research Service. 2009. 18 p. (CRS report for Congress ; RL31673).
15. F-35 Joint Strike Fighter. Development is nearly complete, but deficiencies found in testing need to be resolved : June 2018. 2018. iii, 50 p. (Report to Congressional Committees / United States Government Accountability Office ; GAO-18-321).
16. F-35 Lightning II Program status and fast facts : February 1, 2021 / Lockheed Martin. 2021. 2 p.
17. EJ200. Superior Military Turbofan / Eurojet Turbo GmbH. Hallbergmoos, Germany, 2019. 25 p.
18. Lockheed Martin F-35 Lightning II procurement // Wikipedia : the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_Martin_F-35_Lightning_II_procurement.
19. Hoyle C. F-35 deliveries to reach 121 units this year, Lockheed says // FlightGlobal. URL: <https://www.flightglobal.com/defence/f-35-deliveries-to-reach-121-units-this-year-lockheed-says/141668.article>. Publ. date: 18.12.2020.
20. Sixth-generation fighter // Wikipedia : the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Sixth-generation_jet_fighter.
21. GE Aviation's XA100 adaptive cycle engine completes detailed design // GE Aviation : site. Section "Press Center". URL: <https://www.geaviation.com/press-release/military-engines/ge-aviations-xa100-adaptive-cycle-engine-completes-detailed-design>. Publ. date: 28.02.2019.

-
22. Future Combat Air System: owning the sky with the Next Generation Weapons System // Airbus : site. Section “Defence”. URL: <https://www.airbus.com/newsroom/stories/Future-Combat-Air-System-Owning-the-sky-with-the-Next-Generation-Weapons-System.html>. Publ. date: 17.06.2020.
 23. Airbus, Dassault Aviation sign joint concept study contract for Future Combat Air System (FCAS) // Defpost. URL: <https://defpost.com/airbus-dassault-aviation-sign-joint-concept-study-contract-for-future-combat-air-system-fcas/>. Publ. date: 06.02.2019.
 24. BAE Systems Tempest // Wikipedia : the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/BAE_Systems_Tempest.
 25. F/A-XX Program // Wikipedia : the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/F/A-XX_Program.
 26. F-X истребитель 6 поколения // Военные технологии. URL: <http://ammokor.ucoz.ru/index/0-162>. F-X istrebitel' 6 pokoleniia. Voennye tekhnologii. [F-X fighter aircraft of the 6th generation. Military technologies]. URL: <http://ammokor.ucoz.ru/index/0-162>.
 27. Hussein T. Future fighter aircraft: contractors slate sixth-generation concepts // Airforce Technology: site. Section “Analysis”. URL: <https://www.airforce-technology.com/features/future-fighter-aircraft-sixth-generation/>. Publ. date: 24.05.2019.
 28. Иванов О. Бюджетный убийца // Lenta.ru. URL: <https://lenta.ru/articles/2020/09/21/ngad/>. Дата публ.: 21.09.2020. Ivanov O. Biudzhetnyi ubiitsa [Budget killer]. Lenta.ru. URL: <https://lenta.ru/articles/2020/09/21/ngad>. Date of publication: 21.09.2020.
 29. F/A-XX/FA-XX // GlobalSecurity.org. URL: <https://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/fa-xx.htm>.
 30. F-X/NGAD (Next Generation Air Dominance) // GlobalSecurity.org. URL: <https://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/f-x-2012.htm>.
 31. Trimble S. The nearly decade-long story that led to NGAD flight demonstrator // Aviation Week Network. URL: <https://aviationweek.com/special-topics/air-dominance/nearly-decade-long-story-led-ngad-flight-demonstrator>. Publ. date: 21.09.2020.
 32. Mizokami K. What you need to know about the Air Force and Navy's next fighter jets // Popular Mechanics. URL: <https://www.popularmechanics.com/military/aviation/a22227756/air-force-navy-next-fighter-jets/>. Publ. date: 18.07.2018.
 33. Majumdar D. The U.S. military's 6th-generation fighter: 5 ways to dominate the sky // The National Interest. URL: <https://nationalinterest.org/print/blog/the-buzz/the-us-militarys-6th-generation-fighter-5-ways-dominate-the-14091>. Publ. date: 15.10.2015.
 34. Grynkewich A. An operational imperative: the future of air superiority // Mitchell Institute Policy Papers. 2017. Vol. 7. 20 p.
 35. Lake J. Sixth-gen fighters already on the drawing board // AINonline. Section “Defense”. URL: <https://www.ainonline.com/aviation-news/defense/2019-06-15/sixth-gen-fighters-already-drawing-board>. Publ. date: 15.06.2019.
 36. Щербakov В. NGAD: страсти по американскому истребителю 6-го поколения // Взлет. URL: <http://www.take-off.ru/item/4303-ngad-strasti-po-amerikanskomu-istrebitelyu-6-go-pokoleniya>. Дата публ.: 01.12.2020. Печатная версия материала опубликована в журнале «Взлет» № 11–12/2020. Shcherbakov V. NGAD: strasti po amerikanskomu istrebiteliu 6-go pokoleniia [NGAD: Passion of the American 6th Generation Fighter]. URL: <http://www.take-off.ru/item/4303-ngad-strasti-po-amerikanskomu-istrebitelyu-6-go-pokoleniya>. Date of publication: 01.12.2020. Printed version of the article was published in the Vzlet (Takeoff) magazine no. 11-12, 2020.
 37. Ходаренок М. Война будущего: что показал «истребитель США 6-го поколения» // Новости ВПК. URL: https://vpk.name/news/447370_voina_budushchego_cho_pokazal_istrebitel_ssha_6-go_pokoleniya.html. Дата публ.: 24.09.2020. Khodarenok M. Voina budushchego: “chto pokazal istrebitel' SShA 6-go pokoleniia” [The future war: what the US fighter of the 6th generation showed]. News of the Military-Industrial Complex. URL: https://vpk.name/news/447370_voina_budushchego_cho_pokazal_istrebitel_ssha_6-go_pokoleniya.html. Date of publication: 24.09.2020.
 38. Tirpak J.A. Roper’s NGAD bombshell // Air Force Magazine : site. URL: <https://www.airforcemag.com/article/ropers-ngad-bombshell/>. Publ. date: 01.10.2020.
 39. Gunzinger M.A. Future long-range strike: resetting the balance of stand-in and stand-off forces / The Mitchell Institute for Aerospace Studies, Air Force Association. Arlington, 2020. 45 p.
 40. B-2 Bomber. Cost and operational issue : August 1997. 20 p. (Report to Congressional Committees / United States Government Accountability Office ; GAO/NSIAD-97-181).
 41. F-22 : as of December 31, 2010 : defense acquisition management information retrieval (DAMIR) : selected acquisition report (SAR) : RCS: DD-A&T(Q&A)823-265 / Department of Defense. 2010. 38 p.
 42. F-35 Lightning II Joint Strike Fighter (JSF) Program (F-35) : as of FY 2019 President's Budget : defense acquisition management information retrieval (DAMIR) : selected acquisition report (SAR) : RCS: DD-A&T(Q&A)823-198 / Department of Defense. 2018. 100 p.
-

-
43. KC-46A Tanker Modernization (KC-46A) : as of FY 2018 President's Budget : defense acquisition management information retrieval (DAMIR) : selected acquisition report (SAR) : RCS: DD-A&T(Q&A)823-387 / Department of Defense. 2017. 58 p.
 44. Васильев В. США раскрыли планы о военном доминировании в воздухе над РФ и КНР // Regnum. URL: <https://regnum.ru/news/polit/3104170.html>. Дата публ.: 31.10.2020.
Vasil'ev V. SShA raskryli plany o voennom dominirovanii v vozdukh nad RF i KNR [The United States has revealed plans for military dominance in the air over the Russian Federation and the People's Republic of China]. URL: <https://regnum.ru/news/polit/3104170.html>. Date of publication: 31.10.2020.
 45. Air Force Next-Generation Air Dominance Program : an introduction // In Focus / Congressional Research Service. 2020. IF11659, version 1 new (October 5, 2020). 3 p.
 46. Солонин В.И., Палкин В.А. Программы США по разработке принципиально новых технологий для двигателей шестого поколения военной авиации (обзор) // Авиационные двигатели. 2019. № 4 (5). С. 63–74.
Solonin V.I., Palkin V.A. Programmy SShA po razrabotke printsipial'no novykh tekhnologii dlia dvigatelei shestogo pokoleniia voennoi aviatsii (obzor) [U.S. programs for development of fundamentally new technologies for sixth generation military aircraft engines (review)]. Aviation Engines, 2019, no 4 (5). P. 63–74.
 47. Uecker M. AFRL Roadmap for Meeting Air Mobility Technology Needs : 30 June 2009 : presentation / U.S. Air Force, Air Force Research Laboratory. 2009. 27 p.
 48. The sixth-generation engine of the US military is exposed! If we do not speed up the catch-up, the world may be left behind by the United States for 25 years // Day Day News. URL: <https://daydaynews.cc/en/military/472242.html>. Publ. date: 06.04.2020.
 49. USAF awards Pratt & Whitney \$1bn engine transition contract / AeroTime team // AeroTime Hub. Section "Aviation news". URL: <https://www.aerotime.aero/12618-usaf-awards-pratt-whitney-1bn-engine-transition-contract>. Publ. date: 01.07.2016.
 50. Vdoviar J.W., Knott P.R., Ebacker J.J. Aerodynamic/acoustic performance of YJ101/double bypass VCE with coannular plug nozzle : final report : January 1981 / General Electric ; for NASA Lewis Research Center. 1981. xxi, 292 p. NASA CR-159869.
 51. The ADVENT of a better jet engine? // Defense Industry Daily. URL: <https://www.defenseindustrydaily.com/the-advent-of-a-better-jet-engine-03623/>. Publ. date: 25.06.2015.
 52. Norris G. Future power : Adaptive engine tests pave way for sixth generation fighters and possible F-35 retrofit // Aviation Week & Space Technology. 2015. Vol. 177, nr 2 (February 2–15). P. 26–30.
 53. GE Aviation completes Department of Defense review of Adaptive Engine Design // GE Aviation : site. Section "Press Center". URL: <https://www.geaviation.com/press-release/military-engines/ge-aviation-completes-department-defense-review-adaptive-engine>. Publ. date: 17.06.2015.
 54. GE details Sixth-Generation Adaptive Fighter Engine Plan // Aviation Week Network. URL: <https://aviationweek.com/defense-space/ge-details-sixth-generation-adaptive-fighter-engine-plan>. Publ. date: 29.01.2015.
 55. GE advances future fighter engine // Aviation Week Network. URL: <https://aviationweek.com/defense-space/ge-advances-future-fighter-engine>. Publ. date: 16.06.2015.
 56. GE successfully tests world's first rotating ceramic matrix composite material for next-gen combat engine // GE Aviation : site. Section "Press Center". URL: <https://www.geaviation.com/press-release/military-engines/ge-successfully-tests-worlds-first-rotating-ceramic-matrix-composite>. Publ. date: 10.02.2015.
 57. Adaptive aims // Aviation Week & Space Technology. 2020. Vol. 182, nr 18 (September 14–27). P. 40–43.
 58. Sixth-gen XA100 and XA101 fighter-engine studies ramp up // Aviation Week Network. URL: <https://aviationweek.com/air-transport/aircraft-propulsion/sixth-gen-xa100-xa101-fighter-engine-studies-ramp>. Publ. date: 09.05.2017.
 59. Future initiatives // Installations, Environment, and Energy : site. Section "Programs" / Assistant Secretary of the Air Force (Installations, Environment & Energy). URL: <https://www.safie.hq.af.mil/OpEnergy/Future-Initiatives/>.
 60. USAF looking at Adaptive Engine Upgrade for the F-35 and other platforms // Reddit : site. Section "r/LessCredibleDefence". URL: https://www.reddit.com/r/LessCredibleDefence/comments/8ec0yw/usaf_looking_at_adaptive_engine_upgrade_for_the/.
 61. Reim G. Pratt & Whitney contracted to study upgrading F135 engine // Flightglobal. URL: <https://www.flightglobal.com/fixed-wing/pratt-and-whitney-contracted-to-study-upgrading-f135-engine/140734.article>. Publ. date: 21.10.2020.
 62. NGAD // Wikipedia : the free encyclopedia. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/NGAD>.
 63. Air Power @MIL_STD. The @usairforce plans to spend \$11+ Bn, b/w FY2019 and FY2025, to develop and mature technologies... // Twitter. URL: https://twitter.com/mil_std/status/1233561215974232066. Publ. date: 29.02.2020, 4:35 PM.
-

-
64. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний в обеспечение создания перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / под общ. ред. В.А. Скибина и В.И. Солонина. М. : ЦИАМ, 2004. 424 с. Raboty vedushchikh aviadvigatelistroitel'nykh kompanii v obespechenie sozdaniia perspektivnykh aviatsionnykh dvigatelei (analiticheskii obzor) [Works of leading aero engine companies to ensure creation of advanced aero engines (analytical review)] under general editorship of V.A. Skibin and V.I. Solonin. Moscow: CIAM, 2004. 424 p.
 65. Кужелев Ю. Шагнуть через поколение: как европейцы истребитель FCAS проектировали / youROKer // Альтернативная история. URL: <http://alternathistory.com/shagnut-cherez-pokolenie-kak-evropejtsy-istrebitel-fcas-proektirovali/>. Дата публ.: 29.06.2019. Kuzhelev Yu. Shagnut' cherez pokolenie: kak evropejtsy istrebitel' FCAS proektirovali [Step through a generation: how the Europeans designed the FCAS fighter]. YouROKer. Alternative history. URL:<http://alternathistory.com/shagnut-cherez-pokolenie-kak-evropejtsy-istrebitel-fcas-proektirovali>. Date of publication: 06/29/2019.
 66. Allison G. British Tempest combat jet project gathers pace // UK Defence Journal. URL: <https://ukdefencejournal.org.uk/british-tempest-combat-jet-project-gathers-pace/>. Publ. date: 02.01.2020.
 67. Rolls-Royce unveils Tempest engine technology details : A glimpse of the Tempest's "world-first technology" // KeyAero. URL: <https://www.key.aero/article/tempest-aircraft-engine-technology-unveiled-rolls-royce-keyaero-exclusive>. Publ. date: 15.01.2020.
 68. Robinson T. Tempest fugit // Aerospace : magazine / RAeS. 2020. Vol. 47, nr 8 (August). P. 32–35.
 69. Future Combat Air continues to drive economic advance across the UK // BAE Systems. URL: <https://www.baesystems.com/en/article/future-combat-air-continues-to-drive-economic-advance-across-the-uk#>. Publ. date: 20.07.2020.
 70. UK unveils "Tempest" concept fighter jet // Warfare.Today. URL: www.warfare.today/2018/07/18/uk-unveils-tempest-concept-fighter-jet/. Publ. date: 18.07.2018.
 71. Hopkins G. The rapidly expanding developments of more electric engines for Civil and Defence Integrated Power Systems : presentation / Rolls-Royce. 2011. 36 p. (ISABE 2011 : 20th ISABE Conference).
 72. £30m injection for UK's first uncrewed fighter aircraft // Royal Air Force : site. Section "News". URL: <https://www.raf.mod.uk/news/articles/30m-injection-for-uks-first-uncrewed-fighter-aircraft/>. Publ. date: 25.01.2021.
 73. Future Combat Air System // Wikipedia : the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Future_Combat_Air_System.
 74. Manned-unmanned teaming and remote carriers: transcending individual assets capabilities // Airbus : site. Section "Defence". URL: <https://www.airbus.com/newsroom/stories/Manned-Unmanned-Teaming-and-Remote-Carriers-transcending-individual-assets-capabilities.html>. Publ. date: 08.10.2020.
 75. Indra joins FCAS concept study as contractor // Defpost. URL: <https://defpost.com/indra-joins-fcas-concept-study-as-contractor/>. Publ. date: 29.07.2020.
 76. D'Urso S. Spain is now officially the third nation of the Future Combat Air System (FCAS) Programme // The Aviationist. URL: <https://theaviationist.com/2020/12/15/spain-is-now-officially-the-third-nation-of-the-future-combat-air-system-fcas-programme/>. Publ. date: 15.12.2020.
 77. Next-generation European fighter engine to be developed by joint effort by Safran and MTU Aero Engines // Avitrader. URL: <https://www.avitrader.com/2019/02/06/safran-and-mtu-aero-engines-join-forces-for-next-generation-european-fighter-engine/>. Publ. date: 06.02.2019.
 78. Safran & MTU to partner on Next Generation Fighter engine // Industry Europe. URL: <https://industryeurope.com/safran-mtu-to-partner-on-next-generation-fighter-engine/>. Publ. date: 03.12.2019.
 79. The FCAS is a joint French-German development set to bring about an all-new generation of combat platform for Europe // Military Factory : site. Section "Aircraft/Aviation" URL: https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.asp?aircraft_id=2048. Publ. date: 08.03.2020.
 80. Charpentreau C. European fighter jet demonstrator receives German greenlight // Aerotime. URL: <https://www.aerotime.aero/24554-european-fighter-jet-demonstrator-receives-german-greenlight>. Publ. date: 13.02.2020.
 81. Vogel D. Future Combat Air System: too big to fail // SWP Comment / Stiftung Wissenschaft und Politik = German Institute for International and Security Affairs. 2021. № 2 (January). 8 p.
 82. Дронина И. Истребитель 6-го поколения может стать символом суверенитета Европы // Независимая газета : сайт. URL: https://www.ng.ru/armies/2018-12-24/8_7472_samolot.html. Дата публ.: 24.12.2018. Dronina I. Istrebitel' 6-go pokoleniia mozhet stat' simvolom suvereniteta Evropy [A 6th generation fighter can become a symbol of European sovereignty]. Nezavisimaia gazeta. URL: https://www.ng.ru/armies/2018-12-24/8_7472_samolot.html Date published: 24.12.2018.

Материалы получены редакцией 11.02.2021
