

С 2009 г. на сайте www.paralay.com публиковалась серия статей "На пути к пятому и шестому поколению", посвященная методам проектирования маневренных самолетов. Были рассмотрены основные вехи в развитии концепции самолета - истребителя, наиболее интересные, по мнению, автора экспериментальные и серийные образцы.

Сегодня в интернете активно обсуждаются перспективные аэродинамические схемы магистральных и транспортных самолетов, ударных авиационных систем, таких как американский стратегический бомбардировщик будущего NGV или российский ПАК-ДА (перспективный авиационный комплекс дальней авиации).

Очевидно, что авиационная техника транспортного назначения (а бомбардировщики - это тоже, в некотором смысле, магистральное транспортное средство) достигла предела своего эволюционного развития. Выход из тупика конструкторы ищут в аэродинамических схемах, компоновках и силовых установках принципиально нового типа. Им и будет посвящен новый цикл статей. Мы намеренно оставим в стороне чисто военные вопросы вооружения, РЛС, малозаметности, выживаемости над полем боя. А из бортового оборудования затронем только концепцию более широкого использования электроприводов.



Павел Булат.

Закончил в 88 году БГТУ "Военмех".
Специальность - Механика жидкости, газа и плазмы. Динамика полета.
Кан. физ. - мат. наук,
Кан. экон. наук.
47 лет.

На пути к пятому и шестому поколению, ПЕРЕЗАГРУЗКА

Часть I. Перспективы магистральных и транспортных авиационных систем

*Любой конец есть новое начало.
Нил Гейман. Американские боги*



Рис.1.

В первой статье цикла приведена вводная информация по основным направлениям совершенствования силовых установок (СУ) магистральных самолетов (пассажирских, транспортных и ударных). Кратко рассмотрены вопросы развития двигателей традиционных схем, внедрение инновационных узлов, а также комбинированные и распределенные СУ.

ВВЕДЕНИЕ

В течение многих десятилетий военные разработки использовались на рынке гражданской продукции. Яркими представителями такого подхода в авиационной технике являлись самолеты Ту-104/114, созданные на базе дальнего и стратегического бомбардировщика. Однако в последние годы возобладал прямо противоположный подход. Увеличение сроков эксплуатации военной авиационной техники привело к сравнительно медленному внедрению инноваций в данной области. С другой стороны, постоянное ужесточение экономических и экологических требований к изделиям гражданской авиации привели к быстрому достижению предельно высоких технико-экономических показателей. Дальнейшее следование традиционными путями ведет к лавинообразному росту стоимости.

Сегодня наблюдается массовое внедрение решений, отработанных в составе серийной гражданской продукции, в военную технику. Одним из первых таких примеров стало, наверное, использование в американском зенитном комплексе Patriot процессора Intel 80486 вместо специализированных вычислителей. В результате, было получено снижение стоимости на 2 порядка при увеличении производительности в несколько раз. Сегодня говорят уже о концепции интегрированной модульной авионики, использующей гражданские комплектующие. Аналогичные тенденции наблюдаются и в области аэродинамической компоновки, и области двигателестроения. И если самолету истребителю сложно найти гражданский эквивалент, то принцип "далее, выше, быстрее" применим и к пассажирским самолетам, и к транспортной авиации, и к бизнес-джетам, и к бомбардировщикам, заправщикам и другим представителям боевой авиации, к которым подходит термин "неманевренный". И вот уже обсуждаются бизнес-джеты с изменяемой геометрией крыла и сверхзвуковые ударные летательные аппараты, аэродинамическая схема которых явно заимствована у проектов административных самолетов.



Рис.2.

Многие годы военно-транспортные самолеты и самолеты-заправщики делают на базе общего планера. Сегодня отмечается (см., например, американскую программу Advanced Mobility Aircraft¹), что схожие требования предъявляются и для дальнего бомбардировщика. Везде нужно доставить заданный груз на заданную дальность с максимальной производительностью при минимальных расходах.



Рис.3.

¹ Robert Martinage, Senior Fellow. Stealthy Mobility & Support Aircraft for US Special Operations Forces. Presentation at CSIS—Future of SOF Aviation Project. Feb 22, 2007.

НАПРАВЛЕНИЕ ГЛАВНОГО УДАРА - СИЛОВАЯ УСТАНОВКА

Основные надежды на осуществление прорыва в летно-технических характеристиках самолетов, которые мы, для краткости, будем именовать обобщающим термином "транспортные", связываются с совершенствованием силовых установок.

Ниже рассмотрены основные направления развития реактивных двигателей. Показано, что их совершенствование будет идти по направлению внедрения инновационных узлов в двигатели, построенные по традиционной схеме, а также путем создания гибридных воздушно-реактивных двигателей (ВРД). Последние могут сочетать в себе традиционную газовую турбину и электрический привод, газогенераторы, работающие в соответствии с различными термодинамическими циклами. Вершиной данных работ является объединение в одной конструкции двигателей, способных работать как в атмосфере, так и в космосе.

Суммарный объем годового финансирования, направляемый в мире на исследования в области силовых установок для сверхзвукового полета, оценивается [1] более, чем в 1 млрд. \$. Работы в области модернизации воздушно-реактивных двигателей оцениваются еще в 1,4 млрд.\$ в год. Конкуренция на этом рынке ведется всеми исследовательскими центрами в мире, прежде всего, за государственные гранты, заказы и бюджеты поисковых НИР ведущих корпораций. Только на обзоры будущего авиации и гражданского двигателестроения и только НАСА в 2010-2011 гг. выделено [2] 17,1 млн. \$.

Все эти работы можно разделить на две большие группы [3]:

- ✓ совершенствование узлов двигателей традиционных схем;
- ✓ создание комбинированных двигателей.

Рассмотрим кратко оба направления.

Совершенствование узлов двигателей традиционных схем

Сегодня ставится задача обеспечить:

- ✓ резкое (в 3-5 раз) удешевление конструкции двигателей при сохранении удельных параметров;
- ✓ улучшение на 20-25% топливной экономичности и снижение на 20% удельного веса двигателей.

Этого планируется достичь как за счет традиционного увеличения степени двухконтурности, так и за счет внедрение новых схем "двигателей" и перспективных узлов силовых установок [4]:

- ▶ открытый ротор (10% топливной экономичности),

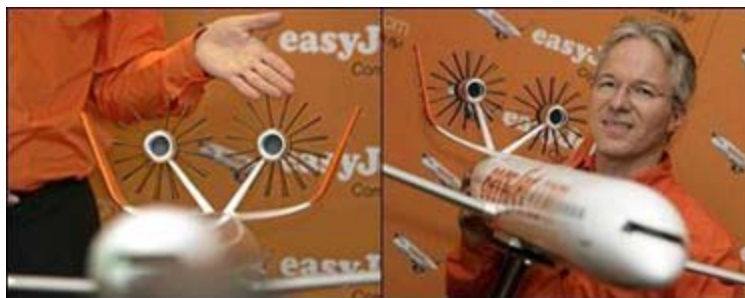


Рис.4.

- ▶ закапотированный винто-вентилятор (5% топливной экономичности),
- ▶ промежуточное охлаждение воздуха между ступенями компрессора (4% топливной экономичности),
- ▶ турбина с противоположным вращением ступеней,
- ▶ управляемая камера сгорания, работающая на сверхбедной топливной смеси (5% топливной экономичности, снижение выбросов NO_x на 50%),
- ▶ легкий композитный компрессор, элементы турбины, изготовленные с использованием матричных композитов.

Новые схемы интеграции силовой установки и планера

Отдельным направлением является более полная интеграция двигателей и планера. Это позволяет создать идеальную циркуляцию вектора скорости вокруг профиля (рис.5) за счет утилизации пограничного слоя в двигателе. Выравнивание профиля скорости за летательным аппаратом существенно снижает индуктивное сопротивление и, соответственно, экономит топливо. И в этой сфере возможно использование, например, детонационного горения как совершенно нечувствительной к неравномерностям на входе газодинамической системы.

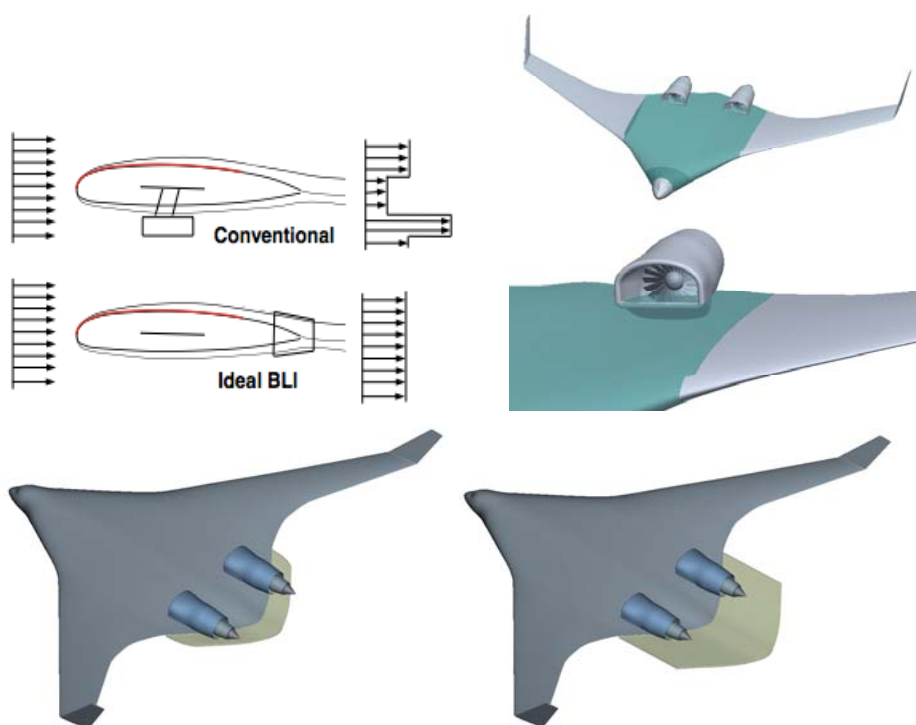


Рис.5. Выравнивание профиля скорости за летательным аппаратом существенно снижает индуктивное сопротивление. На нижнем рисунке продемонстрировано выравнивание профиля скорости при утопленном расположении силовой установки (справа).

Естественным следующим шагом в данном направлении видится силовая установка [5], в которой может быть множество газогенераторов (рис.6), либо множество движителей (сопел и вентиляторов), превосходящее количество газогенераторов (рис.7).

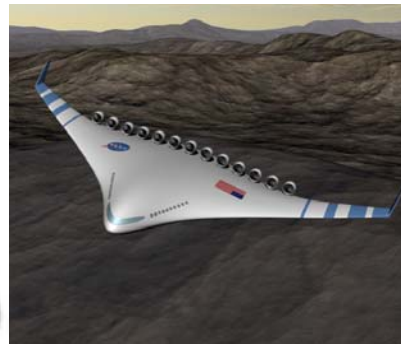


Рис.6. Распределенная силовая установка с множеством газогенераторов.

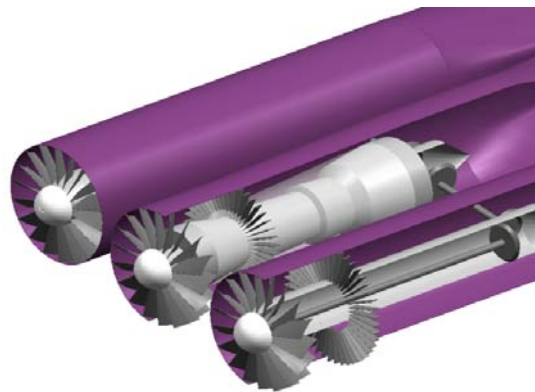
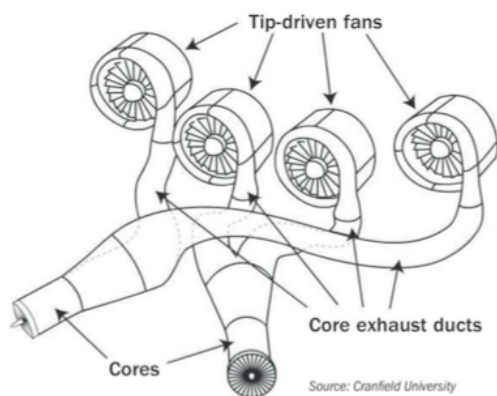


Рис.7. Силовая установка с числом движителей, превосходящим количество газогенераторов.

Эти новшества позволяют, например, собирать элементы, создающие тягу, в пакеты и более равномерно распределять их по задней кромке крыла (рис.8). Все это способствует существенному выравниванию поля скоростей вокруг крыла и увеличению аэродинамического качества.

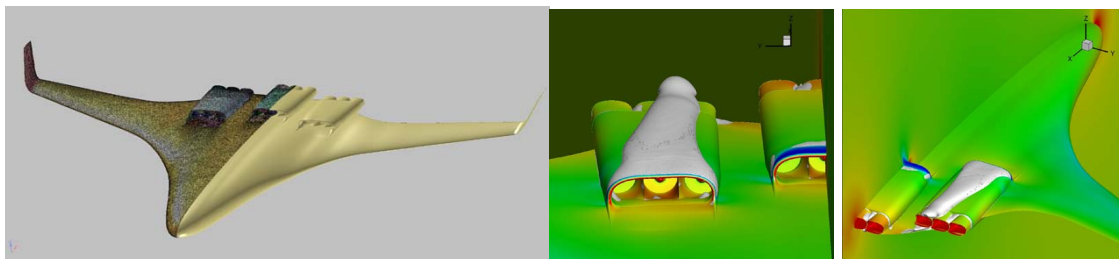


Рис.8. Схема самолета "летающее крыло" с тремя газогенераторами и девятью вентиляторами, собранными в три пакета.

И, наконец, логическим завершением усилий в данном направлении представляется распределенная силовая установка или установка с распределенным газогенератором. При такой схеме двигатель невозможно отделить от конструкции фюзеляжа, настолько полно они интегрированы. Компрессоры и вентиляторы могут быть расположены в любом месте конструкции и необязательно ориентированы по потоку. Турбина может работать не на привод компрессора, а на выработку электроэнергии в генераторе на постоянных магнитах.

Распределенная силовая установка преследует цель достичь максимальных выгод от оптимальной аэродинамической компоновки самолета. В частности она позволяет собрать

пограничный слой почти со всей верхней поверхности самолета и сгнать его в силовой установке (рис.9). Если при этом разместить воздухозаборник вблизи критической точки крылового профиля, то помимо снижения индуктивного сопротивления и обеспечения распределения подъемной силы по размаху крыла, близкому к эллиптическому, можно достичь и максимально возможной циркуляции вектора скорости вокруг профиля крыла.

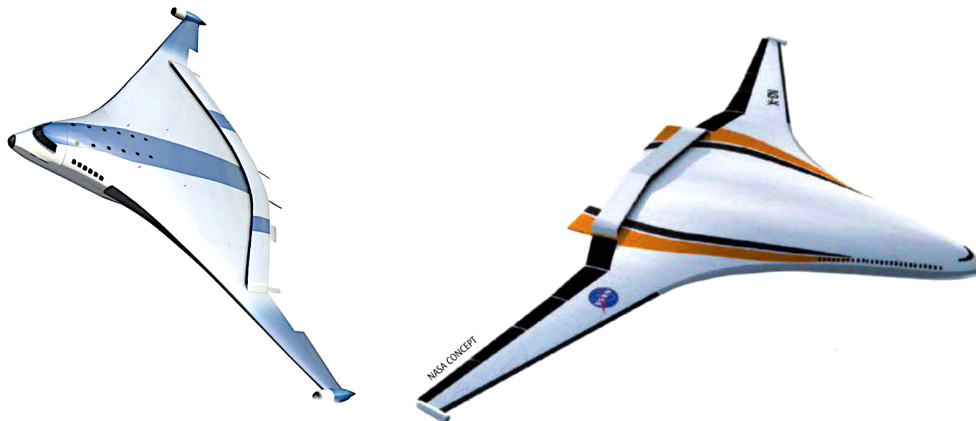


Рис.9. Схема самолета "летающее крыло" с распределенной силовой установкой.

Бесконтактные подшипники и безмасляные трансмиссии

Текущей тенденцией в авиастроении, производстве беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является массовое внедрение электроприводов и отказ от систем, содержащих жидкости (масляной и гидравлической). Одним из решений является внедрение в изделиях аэрокосмической техники безмасляных трансмиссий, в частности, газовых подшипников. Активно рассматриваются вопросы безмасляных трансмиссий и бесконтактных опор ротора ВРД [6-8]. Так например, Hypermach Aerospace Ltd. для своего проекта SonicStar (рис.10) разрабатывает двигательную установку, которая будет сочетать в себе элементы традиционного ВРД и инновационного электрического двигателя, приводящего во вращение компрессор. Предполагается, что двигатель будет иметь переменную степень двухконтурности и электромагнитные опоры ротора. Для управления обтеканием будут использоваться электромагнитные поля, создаваемые магнитами на сверхпроводящих элементах.

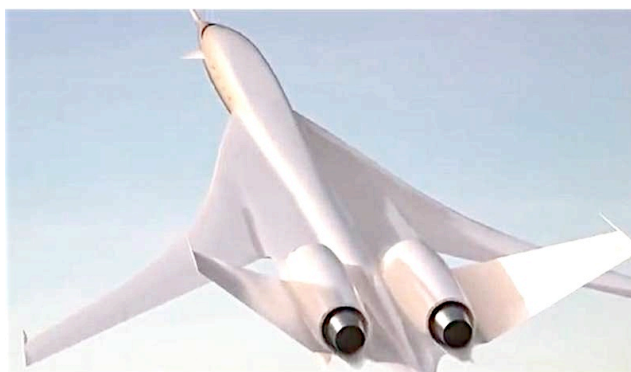


Рис.10. Проект SonicStar фирмы Hypermach Aerospace Ltd.

В ряде случаев бесконтактные подшипники являются единственно возможным вариантом технического решения. В качестве примера можно привести космические ядерные энергетические установки, использующие газовые турбины замкнутого цикла.

Стоимость масляной системы и стандартной трансмиссии, использующей подшипники качения, составляет в типичных силовых установках до 25% стоимости самого двигателя. Применение масла ведет к ограничениям эксплуатации по климатическим условиям. Безмасляные трансмиссии свободны от указанных выше недостатков и могут использоваться повсеместно, если будут преодолены известные технические проблемы - ограничение по грузоподъемности бесконтактных подшипников и восприимчивость к перегрузкам. Изучается применение как газодинамических воздушных подшипников, в которых подъемная сила, действующая на ротор двигателя, создается за счет возникающего при вращении эффекта Бернулли, так и газостатических. В последних используется принудительная подача газа в зазор между ротором и опорой, что позволяет создавать подъемную силу и при нулевых скоростях вращения.

Развитие концепции гибридных (комбинированных) реактивных двигателей

Развитие комбинированных двигателей стирает грань между космонавтикой и авиацией. Ряд схем таких силовых установок позволяет летательному аппарату (ЛА) взлетать как обычному самолету и выходить за пределы стратосферы. Тенденции изменения удельного импульса по мере увеличения числа Маха полета для двигателей различных схем показаны на рис.11. Нельзя не упомянуть в этой связи фирму ReactionEngines (<http://www.reactionengines.co.uk/>). Фирма создана в 1989 г. легендарным Аланом Бондом. Он слышит в Британии "чудиком". Говорят, что у его проектов всего один недостаток - чертежи существуют только в голове Алана. Тем не менее, компания регулярно получает финансирование из разных фондов Евросоюза на развитие проекта космического космолана Scylon, на гиперзвуковой самолет Lapcat, на новаторские турборакетные и гибридные двигатели.

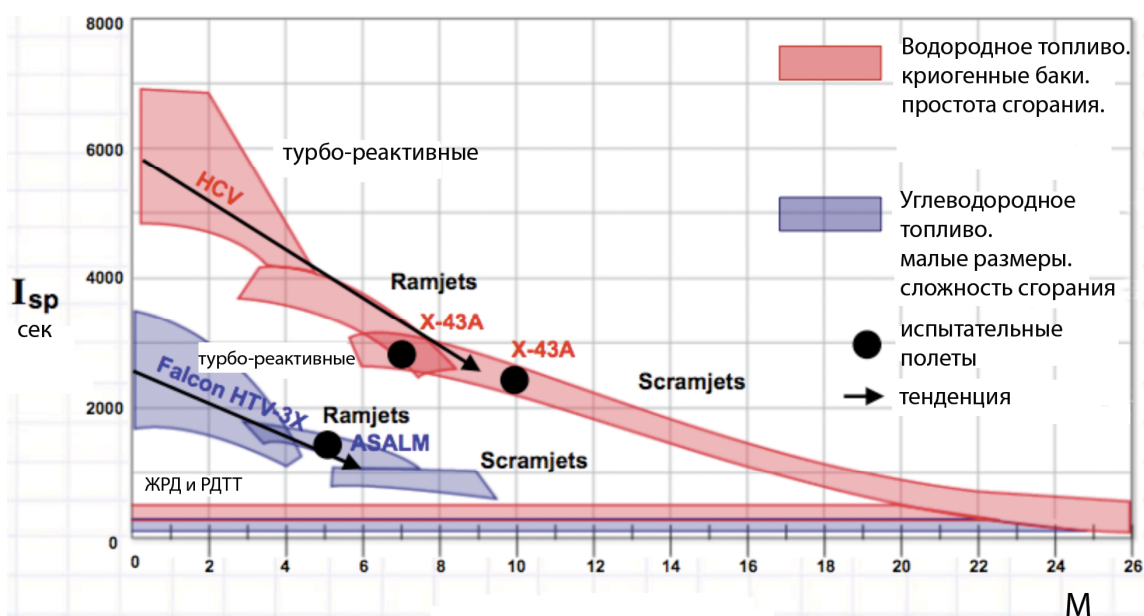


Рис. 11. Сравнение удельного импульса I_{sp} реактивных двигателей различных типов.

Самыми ярким представителем данного направления является проект комбинированного ВРД Scimitar, рассчитанного на число Маха полета $M=5^2$. В конструкции последнего используются такие прогрессивные решения, как эжекторное сопло с большой

² <http://www.reactionengines.co.uk/lapcat.html>

степенью расширения, турбина во внешнем контуре, эффективный теплообменник, охлаждающий воздух перед компрессором.

Следующим шагом в этом направлении является турборакетный двигатель SABRE (рис.12) для воздушно-космического самолета³. В нем использованы такие радикальные решения, как сжижение атмосферного воздуха и подача его в камеру сгорания кислородно-водородного ЖРД. На атмосферном участке двигатель работает как комбинированный. Окислителем выступает кислород воздуха, а горючим жидкий водород. А вот за пределами атмосферы это уже чистый жидкостный ракетный двигатель.

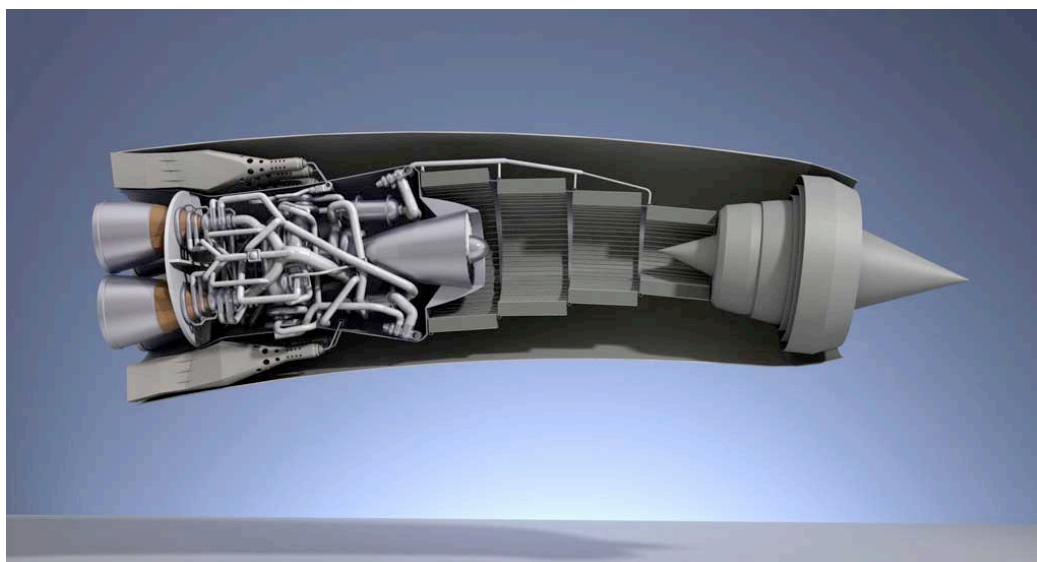


Рис.12. Турборакетный двигатель SABRE.

Рынок для первоочередного внедрения перспективных двигателей

Ведущие мировые производители реактивных двигателей прогнозируют внедрение радикально новых решений после 2030 г. [9]. Тем не менее, существует ряд рынков, на которых появление новинок стоит ожидать гораздо раньше.

Рынок деловой авиации интересен тем, что он менее консервативен с точки зрения внедрения технических новшеств. Здесь вполне по силам небольшой инжиниринговой компании выйти на рынок с проектом новых силовых установок.

Прогнозируется и появление рынка сверхзвуковой деловой авиации [10]. Так компания Aerion (<http://aerioncorp.com/>) продвинулась дальше всех в разработке проекта сверхзвукового самолета. Она уже приступила к подготовке сертификации своего сверхзвукового бизнес-джета (рис.13), который должен выйти на рынок в конце десятилетия. Этот корпоративный самолет будет рассчитан на перевозку 8-12 пассажиров. Самолет оптимизирован на скорости 0,95 М и 1,5 М. Компания Aerion сообщает, что у них уже есть около 50 потенциальных заказов на сверхзвуковой бизнес-джет.

³ http://www.reactionengines.co.uk/sabre_howworks.html

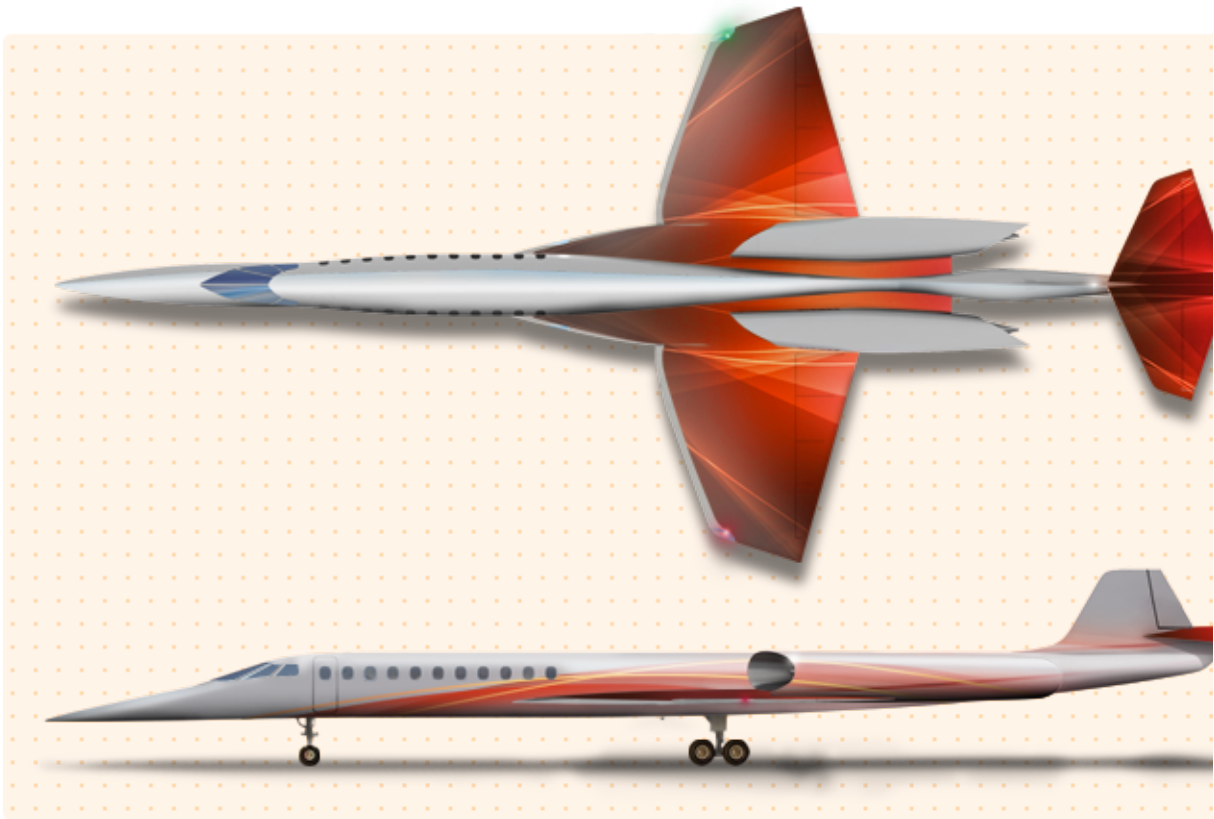


Рис. 13. Сверхзвуковой бизнес-джет фирмы Aerion.

Перспективы данного сегмента рынка связаны с успехами или неудачами в решении двух принципиальных проблем: снижение уровня звукового удара на местности; радикальное улучшение экономичности силовой установки на сверхзвуковых скоростях. Первая проблема близка к разрешению [11]. Для решения второй необходим переход к комбинированным двигателям или новым термодинамическим циклам сжигания топлива.

Заключение

Таким образом, можно констатировать, что отрасль аэрокосмического двигателестроения стоит на пороге технологической революции. Эволюционное развитие традиционных ВРД привело к тому, что их технические характеристики вплотную приблизились к теоретическому пределу. Дальнейшее совершенствование дается ценой огромных затрат и не приводит к существенным улучшениям потребительских свойств летательного аппарата. Выход видится специалистами во внедрении инновационных узлов и разработке двигателей, совмещающих термодинамические циклы разного вида.

Следующая статья цикла будет посвящена модному направлению детонационных двигателей.

Литература

1. Max Mach Hypersonic Goes Global. Aviationweek&space nechnology. Nov 26, 2012.
2. Mark F. Mangelsdorf Chief Engineer (Acting) Environmentally Responsible Aviation (ERA) Project. Overview of ERA's Advanced Vehicle Concepts NRA. N+2 Advanced Vehicle Concepts & Quick-Starts NRA Pre-Proposal Meeting February 19, 2010.
3. Aviation week. Vol. 174, №42, november, 2012.
4. John Whurr. Chief Project Engineer, Future Programmes of RR. Future Civil Aeroengine Architectures & Technologies.
5. G.A. Hill*, S.A. Brown†, and K.A. Geiselhart. NASA Langley Research Center, Hampton, VA 23681 C.M. Burg. Aerospace Systems Design Lab, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332. Integration of Propulsion-Airframe-Aeroacoustic Technologies and Design Concepts for a Quiet Blended- Wing-Body Transport.
6. Смирнова О.С., Булат П.В., Продан Н.В. ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ГАЗО- И ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ В ТУРБОНАСОСНЫХ АГРЕГАТАХ МНОГОРАЗОВЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ЖРД, "Фундаментальные исследования", №4(2). 2013г., с. 335-339. Ссылка: <http://www.rae.ru/fs/478-r31193/>.
7. Усков В.Н., Булат П.В. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть I. Постановка задачи // Вестник МАХ. – 2012. – № 3. – С. 3–7.
8. Усков В.Н., Булат П.В. Об исследовании колебательного движения газового подвеса ротора турбохолодильных и детандерных машин. Часть II. Колебания давления в соплах питающей системы на сверхкритическом режиме работы // Вестник МАХ. – 2012. – № 1. – С. 57–60
9. Dr. Dale Carlson. GE Aviation: Perspectives on Clean, Efficient Engines. May 7, 2013.
10. «Транспорт-2011»: перспективному самолету быть! ПРЕСС-РЕЛИЗ ЦАГИ. 14 марта 2012 г. Жуковский, МО.
11. John M. Morgenstern, Michael Buonanno and Nicole Nordstrud Lockheed Martin Aeronautics Company, Palmdale, CA 93599. N+2 Low Boom Wind Tunnel Model Design and Validation. 30th AIAA Applied Aerodynamics Conference 25 - 28 June 2012, New Orleans, Louisiana AIAA 2012-3217.