

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ В МЕЖПЛАНЕТНУЮ ГЕОГРАФИЮ

ЖУРНАЛ О ТОМ, КАК УСТРОЕН МИР

февраль 2018

Популярная Механика

РУССКОЕ ИЗДАНИЕ
www.popmech.ru

SABRE

ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ КОСМОЛЕТА



5·6

ИНТЕРНЕТ
ДЛЯ РОБОТОВ

ЕВРОРАКЕТЫ
«ИСКАНДЕРЫ»
ПРОТИВ «ТОМАГАВКОВ»

3D-ДОМ

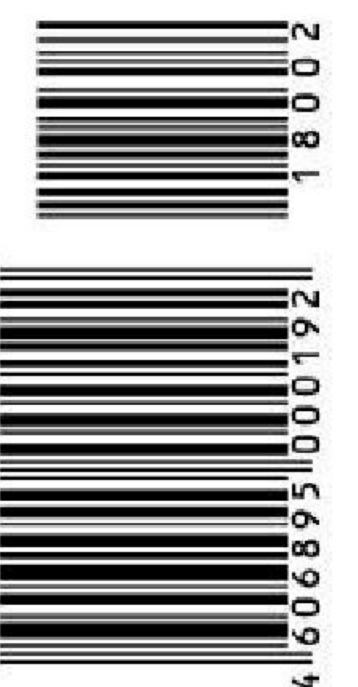
СТРОИТЕЛЬНЫЙ ПРИНТЕР

ЗАКАЧАЕШЬСЯ

СИЛИКОНОВЫЕ МЫШЦЫ СВОИМИ РУКАМИ

16+

Popular
Mechanics



ТЕХНОЛОГИИ

ТЕКСТ:
КОНСТАНТИН
ПРЕДАЧЕНКО

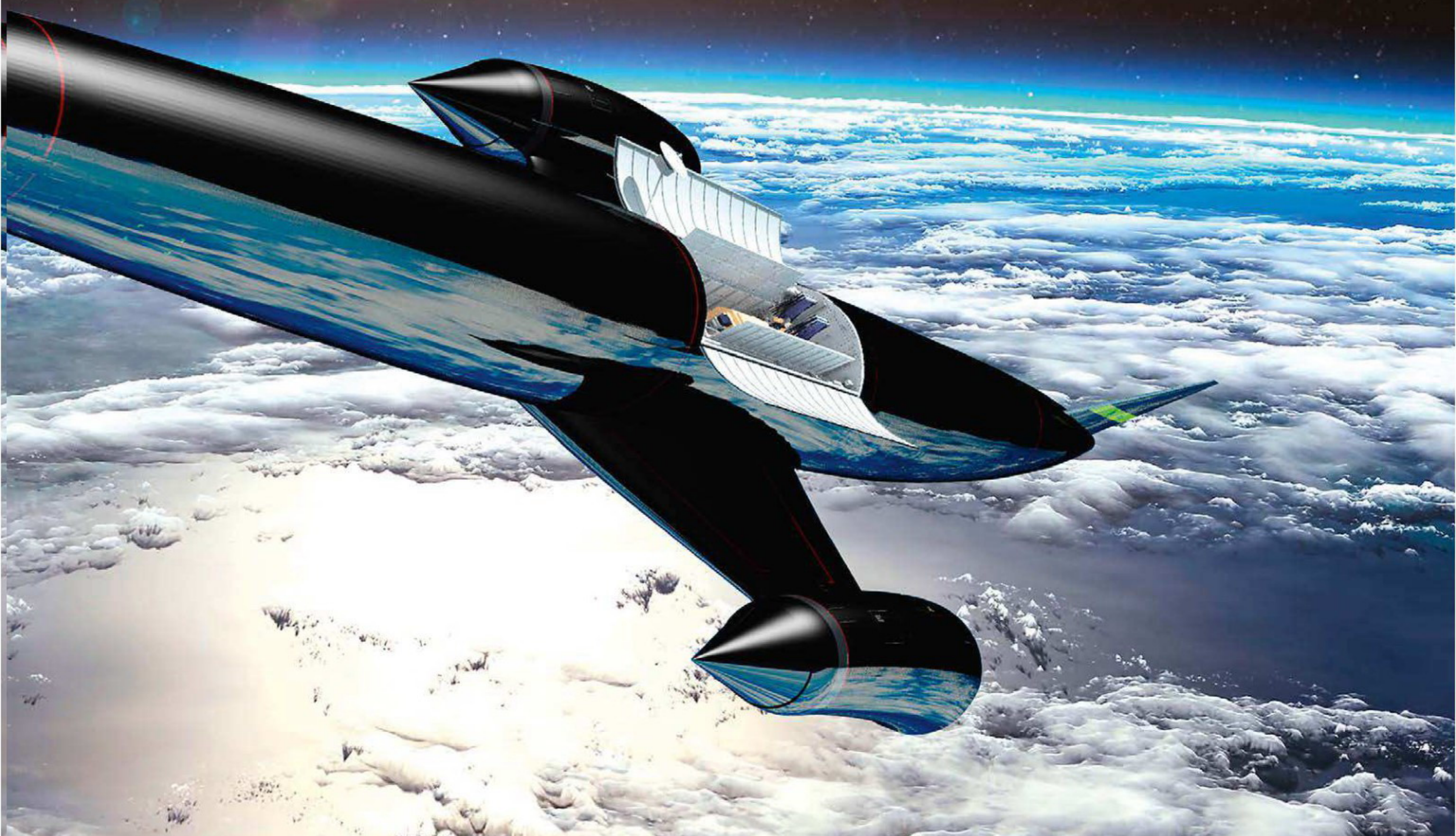
КОСМОС

ДВИГАТЕЛЬ



ЧЕРЕЗ ДЕСЯТЬ ЛЕТ ПОСЛЕ УДАЧНОГО ШТУРМА КОСМОСА НЕСКОЛЬКО СТРАН ЗАТЕЯЛИ ЧРЕЗВЫЧАЙНО АМБИЦИОЗНЫЕ ПРОЕКТЫ ПО ЕГО ДАЛЬНЕЙШЕМУ ОСВОЕНИЮ. В 1971 ГОДУ США ЗАПУСТИЛИ ПРОГРАММУ SPACE SHUTTLE, ЧЕРЕЗ ПЯТЬ ЛЕТ СССР НАЧАЛ РАЗРАБОТКУ СИСТЕМЫ «ЭНЕРГИЯ – БУРАН», А ЕЩЕ ЧЕРЕЗ ШЕСТЬ ЛЕТ К ГОНКЕ ПОДКЛЮЧИЛАСЬ ВЕЛИКОБРИТАНИЯ С ПРОЕКТОМ HOTOL (HORIZONTAL TAKE-OFF AND LANDING).

ДЛЯ КОСМОЛЕТА



Многие специалисты считают именно английский проект самым революционным: если США и СССР развивали традиционные ракетные технологии, заложенные еще Вернером фон Брауном, то Великобритания решила создать принципиально новый воздушно-космический самолет. Самим аппаратом занималась British Aerospace, а уникальный воздушно-реактивный двигатель должна была разработать компания Rolls-Royce. Планировалось, что HOTOL будет взлетать с разгонной аэродромной тележки, двигатель начнет работать в воздушно-реактивном режиме (до высоты около 28 км), используя в качестве окислителя заборный воздух, после чего перейдет в режим классического ракетного жидкостного двигателя. Создание такого двигателя и сейчас задача почти фантастическая, что же говорить о восьмидесятих годах. Довольно скоро Rolls-Royce столкнулась с рядом трудностей, повлекших незапланированный рост затрат на исследовательские работы. В итоге British Aerospace решила отказаться от революционного двигателя и вступить в кооперацию с СССР, переименовав проект в Interim HOTOL. Аппарат планировали оснастить советскими ЖРД и запускать с модифицированного самолета Ан-225. Сотрудничество началось в 1991-м, однако в этом же году Советский Союз закончил свое существование, похоронив под своими обломками и совместный проект.

НОТОЛ

Беспилотный аппарат был предназначен для доставки полезной нагрузки массой около 7–8 т на низкую орбиту высотой 300 км. Он должен был взлетать с взлетно-посадочной полосы, размещаясь на фюзеляже большого самолета-носителя с ракетными ускорителями, которые должны были помочь разогнать аппарат до скоростей, оптимальных для работы его двигателей. Двигатели должны были переключаться с воздушно-реактивного на ракетный режим работы при достижении аппаратом скорости в 5–7 М.

ТРИ В ОДНОМ

Не все были согласны с таким положением дел. После сворачивания работ над RB545 в 1989 году ведущий конструктор двигателя Алан Бонд забрал с собой двух инженеров Rolls-Royce и основал собственную компанию – Reaction Engines. Она сосредоточилась на создании гибридного двигателя SABRE (Synergistic Air-Breathing Rocket Engine) и разработке других технологий для воплощения проекта космолана Skylon. Многие эксперты считают, что проект SABRE способен перевернуть современную космонавтику и сделать возможным создание одноступенчатого космического аппарата. Он может работать на первом этапе полета как турбореактивный двигатель, в качестве окислителя забирая заборный воздух. На втором этапе – как прямоточный двигатель, а на третьем – как обычный ракетный двигатель, используя внутренний бортовой окислитель.

Идея одноступенчатого многофазового воздушно-космического аппарата (SSTO, Single Stage to Orbit) далеко не нова, но на пути ее воплощения стоит ряд препятствий – низкий уровень весовой отдачи конструкции и недостаточный удельный импульс существующих ракетных двигателей. Это взаимосвязанные параметры: повысив удельный импульс (который показывает, сколько секунд данный



двигатель сможет создавать тягу в 1 Н, истратив при этом 1 кг топлива), вы можете получить ту же тягу с меньшим расходом топлива и окислителя, что позволяет сделать конструкцию большей массы. Однако существующие жидкостные ракетные двигатели имеют удельный импульс в вакууме порядка 400 с (рекорд для кислород-водородных КВД1 и RL-10 составляет 462 с, двигатели на экзотических компонентах – например, использующие водород-литий-фтор – позволяют получить на сотню больше, однако с ними столько проблем, что игра не стоит свеч).

НЕ РАКЕТА, НЕ САМОЛЕТ

В то же время двигатели современных авиалайнеров имеют удельный импульс на порядок выше, приближаясь к цифре 6000 с, и даже «прожорливый» двигатель сверхзвукового Concorde имел удельный импульс всего в два раза ниже – 3000 с (почти в десять раз экономичней космической ракеты). Такая радикальная разница из-за иного принципа работы: воздушно-реактивный двигатель на каждую часть топлива использует 14 частей воздуха (если топливо – водород, то 30), а ракетному приходится черпать из баков все, что потом улетит в сопло.

Можно, конечно, использовать воздушно-реактивный двигатель на части траектории выведения, которая проходит сквозь плотные слои атмосферы, с его экономичностью и отсутствием необходимости в окислителе. Но не все так просто. Космическая ракета стремится пройти плотные слои атмосферы

быстро, проткнув их на вертикальном участке траектории, а уже потом заваливая траекторию горизонтально. Аппарат с ВРД не может позволить себе такой роскоши – он должен максимально использовать бесплатный окислитель за бортом, потому его траектория пологая и долгое время проходит в плотных слоях атмосферы, с большой скоростью полета на этом участке. Все это время аппарат находится под воздействием скоростного напора набегающего потока, что требует упрочнения конструкции и повышения эффективности теплозащиты – и то и другое тянет за собой увеличение веса. Есть еще одна хитрость – возможность использовать подъемную силу крыла: если ракета с вертикальным стартом висит на тяге двигателей и при наборе высоты тяга должна быть больше ее веса, то крылатый аппарат с аэродинамическим качеством 5 для набора высоты должен иметь тягу всего лишь больше 1/5 веса. Однако крылья – это тоже дополнительный рост веса конструкции. Все это затягивается в тугий клубок противоречий, решить которые на современном технологическом уровне, получив преимущества над многоступенчатой системой, достаточно сложно.

САМЫЙ МОЩНЫЙ ХОЛОДИЛЬНИК В МИРЕ

Алан Бонд со своей командой столкнулся с теми же проблемами, что и его предшественники: среди всего множества существующих типов воздушно-реактивных двигателей нет универсала, каждый из них отличается разной эффективностью, каждый хорош в своем диапазоне скоростей, обладает своего рода узкой специализацией. Турбореактивный двигатель отлично работает в диапазоне от 0 до 3 М, но разгон с его помощью до больших скоростей затруднителен: воздух при торможении в воздухозаборнике нагревается так сильно, что дальнейшее сжатие его компрессором приводит к росту температуры до величин, выходящих за пределы термостойкости материалов камеры сгорания и турбины. Прямоточный воздушно-реактивный двигатель и гиперзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель (последний отличается сверхзвуковым течением в камере сгорания) отлично работают на больших скоростях (X-43А достиг 10 М), однако не работают на малых. Турборакетные двигатели обладают низким удельным импульсом и тяговооруженностью (они тяжелы для той тяги, что создают). В свое время большие надежды возлагали на двигатель со сжижением кислорода (LACE, Liquid Air Cycle Engine), в котором криогенное топливо идет через теплообменник, забирая тепло у набегающего потока до температуры сжижения воздуха, далее через сепаратор, где кислород отделяется от азота и подается в камеру сгорания. Однако такой двигатель тяжел, конструктивно сложен (прощай, надежность) и имеет повышенный расход топлива (водорода на охлаждение тратится больше, чем можно сжечь в камере сгорания с полученным жидким кислородом, а это потери удельного импульса). Впрочем, от LACE Алан Бонд решил позаимствовать идею охлаждать воздушный поток в теплообменнике.

Одна из самых сложных и важных деталей SABRE – криогенный теплообменник. Он должен практически мгновенно охлаждать входящий воздух, который нагревается при сжатии до 1000 °С, до температуры порядка –140 °С. До сих пор это никому не удавалось.



В итоге инженеры пришли к необходимости комбинированной силовой установки из разных двигателей, в которой каждый работает на своем участке (например, для старта используется турбореактивный, для высокоскоростного разгона – прямоточный, для внеатмосферного полета – ракетный). Ракетный двигатель – необходимый компонент коктейля, остальные по вкусу, в разных комбинациях. Однако это порождает определенные проблемы: на всех режимах полета нужно везти мертвый груз в виде двигателя для другого участка траектории, растет аэродинамическое сопротивление из-за сопел неработающих двигателей. Альтернатива – гибридная силовая установка, которая сочетает в себе качества (и агрегаты) всех типов двигателя. Сопло ведь нужно всем? Так зачем тащить несколько, используем одно для всех. Воздухозаборник нужен всем, кроме ракетного? Используем один, а потом закроем заподлицо, чтобы сопротивления не создавал. В этом направлении и двигалась мировая конструкторская мысль (даже силовая установка самолета SR-71 Blackbird – гибрид турбореактивного и прямоточного двигателей, некоторые зенитные ракеты используют ракетно-прямоточный).

ОЧЕНЬ БЫСТРЫЙ ГИБРИД

Двигатель компании Reaction Engines – SABRE – вполне подходит на роль ключевой технологии, с помощью которой можно разрубить гордиев узел противоречий и реализовать одноступенчатый воздушно-космический аппарат. Этот гибрид сочетает в себе качества турбореактивного (хотя турбину компрессора крутят не выхлопные газы, а горячий гелий в замкнутом цикле), прямоточного и ракетного двигателей и работает с достаточной эффективностью на всех участках траектории,

от взлетной полосы до орбиты. Расчеты Reaction Engines показывают, что в случае применения ЖРД общий вес корабля и полезной нагрузки должен составлять 13% от стартового веса для вывода полезной нагрузки 15 т на низкую опорную орбиту. Двигатель SABRE позволяет при тех же условиях довести вес корабля с полезной нагрузкой до 22% – цифра вполне достижимая при современном уровне технологий.

SABRE, как и его предшественник RB545, – гибридный воздушно-реактивный двигатель с предохлаждением потока. Здесь, как и в LACE, за воздухозаборником стоит криогенный теплообменник, однако входящий поток не сжимается, всего лишь охлаждаясь до низких температур. Далее воздух с температурой порядка $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ (до этого он нагрелся при торможении свыше $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) поступает в простой турбокомпрессор из легких сплавов (низкая температура воздушного потока позволила облегчить его на три четверти по сравнению с компрессором турбореактивного двигателя), сжимающий газы до давления камеры сгорания, в которой газообразный воздух смешивается с жидким водородом. При выходе из плотных слоев атмосферы воздухозаборник запирается створками, а камера сгорания питается жидким кислородом из внутренних баков. Поскольку расход водорода на охлаждение больше, чем окислителя в полученном воздухе, избыток $(2/3)$ потока, прошедшего теплообменник, дожигается во втором контуре, смешиваясь с той частью воздуха, которая не поступила в теплообменник.

СХЕМА SKYLON

- | | |
|----------------------------|--------------------------------------|
| 1. Керамический обтекатель | 7. Воздухозаборник |
| 2. Носовые стабилизаторы | 8. Теплообменник |
| 3. Бак с жидким кислородом | 9. Двигатель SABRE |
| 4. Бак с жидким водородом | 10. Орбитальные маневровые двигатели |
| 5. Грузовой отсек | |
| 6. Блок управления | |



SABRE: ИСТОРИЯ И ПРЕДЫСТОРИЯ

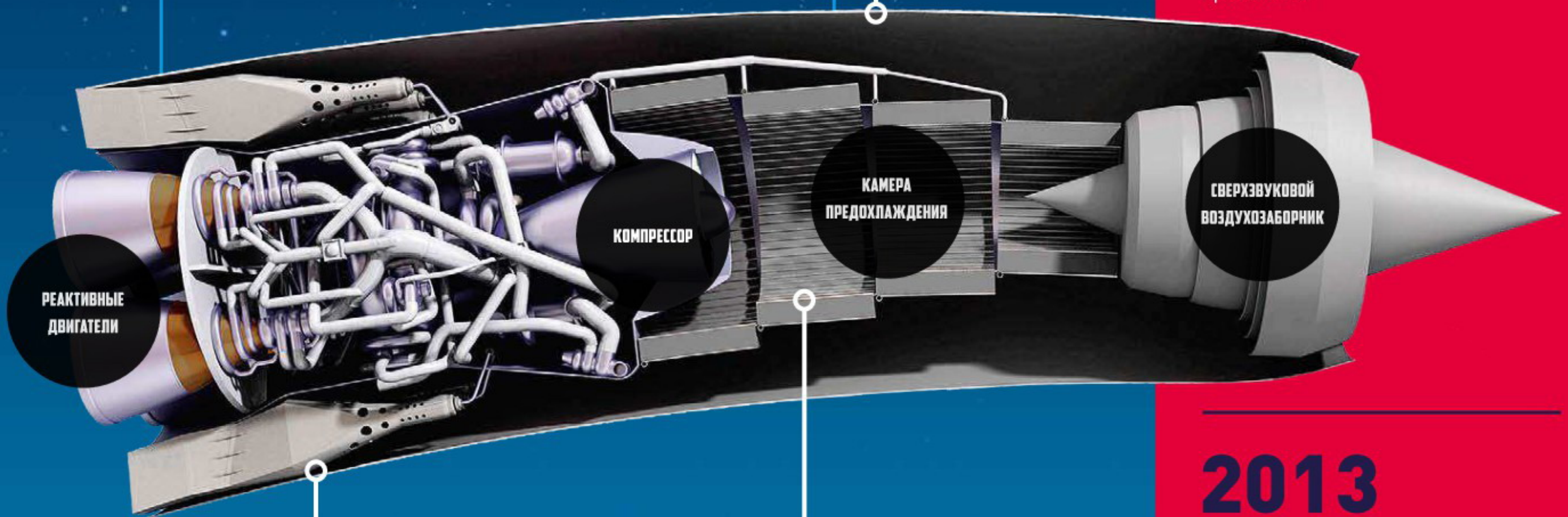
Революционный двигатель SABRE разрабатывается Reaction Engines при поддержке BAE Systems. Ожидается, что он сможет поднять самолет в воздух и разогнать его до 5 М, после чего перейдет в реактивный режим работы – для скоростей до 25 М.

ГОНДОЛА

SABRE монтируется в гондоле, как обычный авиадвигатель

2015

BAE Systems инвестирует в Reaction Engines 20 млн фунтов для создания и испытаний прототипа



РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

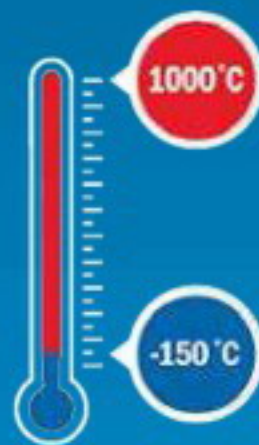
КОМПРЕССОР

КАМЕРА ПРЕДОХЛАЖДЕНИЯ

СВЕРХЗВУКОВОЙ ВОЗДУХОЗАБОРНИК

ТЕРМОДИНАМИКА

Эффективная работа теплообменников позволяет экономить топливо



УЛЬТРАЛЕГКИЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

Охлаждение поступающего воздуха от 1000 до 150 °C происходит быстрее 0,01 с

2013

Британское правительство направляет на поддержку проекта 50 млн фунтов стерлингов

2012

Успешные испытания теплообменника для системы предварительного охлаждения

2003

Успешное решение проблемы обледенения воздухозаборника

1990

Начало разработки SABRE

1903

Первый полет самолета братьев Райт, оснащенного двигателем

1935

Появление одного из самых массовых транспортных самолетов в истории, Douglas DC-3

1952

Начало коммерческой эксплуатации реактивного пассажирского авиалайнера de Havilland Comet

1962

Запуск первого в мире коммерческого спутника Telstar 1

1969

Турбореактивные двухконтурные двигатели делают Boeing 747 первым дальнемагистральным широкофюзеляжным пассажирским самолетом

1981

Начало полетов кораблей Space Shuttle



Однако принципиальная схема по сравнению с RB545 несколько изменилась: добавилась промежуточная петля с жидким гелием – теперь водород охлаждает гелий, а гелий уже отбирает тепло у воздуха и, нагревшись, крутит турбину компрессора и насосов, после чего поступает на повторное охлаждение. Это позволило избежать проблем водородной хрупкости в температурно-напряженном теплообменнике воздухозаборника. Компоновка космического аппарата тоже изменилась: тонкое веретено корпуса оснащено треугольным крылом со слегка искривленными мотогондолами на его концах.

ЗАПАРИЛИСЬ

История создания SABRE – это прежде всего история разработки и совершенствования теплообменника, поскольку все завязано на его характеристики. Он должен извлечь из воздуха до 400 МВт тепла, при этом иметь минимальный вес, малые габариты, малое гидравлическое сопротивление (чтобы обеспечить заданный расход хладагента без установки тяжелых насосов), работать в условиях громадного перепада температур и давлений, сохранив целостность на протяжении всего жизненного цикла аппарата, и быть технологичным в изготовлении. По словам Алана Бонда, современные промышленные теплообменники такой мощности имеют вес в 30 раз больше, чем допустимо для применения на борту одноступенчатого космического аппарата (18 т против 600 кг, заложенных в конструкцию SABRE). Ответ, как часто бывает, подсказала природа. Жабры рыб имеют разветвленную систему капилляров, в которых более тонкая сеть трубочек вливается в толстые сосуды. Это оказалось именно тем решением, которое позволяет снизить сопротивление току жидкости при достаточной площади теплообмена. Существующие теплообменники, как правило, имеют набор трубок равного диаметра, в новой же конструкции применяются изогнутые тонкостенные трубки диаметром 0,9 мм с толщиной стенок 30 нм из сплава Inconel 718, которые соединяют основные трубопроводы большего диаметра. Для изготовления применяется пайка, а отверстия в основных трубопроводах прожигаются лазером. Был изготовлен опытный образец теплообменника, который поместили перед установленным на стенде реактивным двигателем Rolls-Royce Viper. Инженеры провели цикл наземных испытаний, в которых модуль прошел 200 рабочих циклов по 5 минут каждый – больше, чем за планируемый жизненный цикл аппарата Skylon.

При охлаждении воздуха до $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ неизбежно возникает проблема обледенения: весь пар (а при этой температуре уже не только пар, но и углекислый газ), который содержался в окружающем воздухе, превращается в лед. При первом пробном запуске теплообменник за считанные секунды покрылся сплошной коркой льда, который полностью забил все каналы для воздуха. По заявлению Reaction Engines, в настоящее время проблема решена, однако компания избегает даже малейших намеков на то, каким образом это удалось, ссылаясь на коммерческую тайну. Некоторое

представление можно получить, посмотрев, как с обледенением справлялись в проекте RB545. Охлаждение потока там проводилось в две стадии: первый теплообменник охлаждал воздух до $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, превращая почти весь пар в туман, а затем впрыск жидкого кислорода моментально снижал температуру потока до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вся оставшаяся влага (перед этим опционально стоял еще влагоуловитель) моментально превращалась в мелкодисперсные кристаллы льда, не замерзая на трубки теплообменника.

Поскольку двигатель обладает высокой термодинамической эффективностью, разработчики использовали простой и легкий осесимметричный воздухозаборник с двухскачковой системой торможения воздушного потока с повышением его давления до 1,3 бара. Альтернативой был вариант с плоским клином сжатия, представленный на эскизах HOTOL. Он обладает большей эффективностью (большее число косых скачков уплотнения минимизирует потери полного давления на входе), однако при изменении числа Маха необходимо регулировать углы наклона множества поверхностей, чтобы все скачки сошлись в одну точку. Эта механизация с шарнирами и приводами тянет за собой дополнительный вес. В осесимметричном двухскачковом воздухозаборнике задача решается только перемещением конуса взад-вперед.

КЛИН КЛИНОМ

Сопло двигателя тоже высокотехнологичный агрегат, имеющий отличия от классического колокола сопла Лаваля, применяющегося на современных жидкостных реактивных двигателях. Существенной проблемой одноступенчатых аппаратов является изменение давления на срезе сопла: оптимизированное под вакуум сопло не даст той тяги в атмосфере, и наоборот. В результате весь участок разгона сопло будет работать то с недорасширением, то с перерасширением, что приведет к падению удельного импульса. В многоступенчатых аппаратах можно оптимизировать сопло каждой ступени под давление на участке ее работы (оно тоже варьируется, но не в таком широком диапазоне). В одноступенчатых нужно или применять сопло изменяемой геометрии (а это дополнительный вес механизмов и приводов), или мириться с потерей эффективности. Решить эту проблему позволяют двигатели с высотной компенсацией, в которых расширяющийся сверхзвуковой поток газа только с одной стороны ограничен стенкой сопла, с другой же – внешняя среда. К таковым относится клиновоздушный ракетный двигатель (aerospike engine, применялся в американском проекте X-33) и expansion-deflection nozzle – именно

такой тип сопла разрабатывается в рамках научно-исследовательских программ STERN и STRICT для SABRE. Этот тип сопла имеет такой же колокол, как и у сопла Лавалья (правда, короче и другой геометрии), с центральным телом по оси, отклоняющим поток к стенкам колокола (по форме похоже на впускной клапан в цилиндре ДВС). За центральным телом остается не занятая выхлопными газами зона, позволяющая компенсировать влияние давления окружающей среды.

ОДНИ ПРОБЛЕМЫ

И это далеко не все сложности. Перед инженерами Reaction Engines стоит ряд других задач: создание систем охлаждения камеры сгорания (на атмосферном участке полета предлагается охлаждать воздухом, пропущенным через рубашку, вне атмосферы – жидким кислородом), отработка сопел системы орбитального маневрирования, промежуточного теплообменника между водородом и гелием (предлагается использовать керамическую матрицу), турбины для жидкого гелия (тут планируется применять оригинальную систему с рабочими колесами противоположного направления вращения) и решение аэродинамических проблем с конструкцией самого космолета.

Все эти работы выполняются в основном на деньги частных инвесторов с минимальным привлечением бюджетного финансирования. При этом сложность возникающих проблем превышает возможности современ-

ного компьютерного моделирования, и многое приходится решать экспериментом на натуральных стендах (так, для отработки геометрии сопел планируется запуск суборбитальной ракеты, которая пройдет атмосферный участок с тем же числом Маха на заданной высоте, в планах и создание летательного аппарата для отработки компоновки мотогондолы). Еще недавно Алан Бонд говорил, что первый полет планируется в 2029 году, а сейчас называет уже 2024 год. И это будет самолет, который выведет на круговую орбиту 1300 кг. Успех этих работ может существенно снизить цену вывода груза на орбиту, сделать ближний космос столь же доступным, как Антарктика, а технологии двигателей с предохлаждением можно использовать и на Земле – для воздушных перевозок с гиперзвуковой скоростью.

Декабрь ушедшего года принес свежие новости: наряду с возводимым в Великобритании (Уэсткотт, графство Бакингемшир) испытательным стендом для двигателя SABRE Reaction Engines начала строительство еще одного стенда в США. Работы ведутся на средства гранта, выделенного DARPA. А это значит, что к финансированию подключился Пентагон. На стенде будет испытываться система предохлаждения перспективной силовой установки. **ИИМ**

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ МНОГОРАЗОВЫХ КОРАБЛЕЙ

ПРОЕКТЫ КОРАБЛЕЙ С ДВИГАТЕЛЯМИ SABRE НА ФОНЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЧЕЛНОКОВ СМОТРЯТСЯ КАК ЗВЕЗДОЛЕТЫ ИЗ «ЗВЕЗДНЫХ ВОЙН». ЭТО ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ПРИНЦИПИАЛЬНО ДРУГИЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ



CFASTT-1

Проект космолета с двигателями SABRE шотландского исследовательского университета Стратклайда
Длина – 83 м

SKYLON C2

Проект космолета
Reaction Engines
Длина – 83 м

STS ORBITER

Космолан проекта
Space Shuttle NASA
Длина – 37,24 м