

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Серия: АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНАЯ ТЕХНИКА

• Самолет Боинг 787



ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Выпуск 1 — 2 (1829 — 1830)
Январь — июнь 2014 г.
Издается с 1939 г.

(ОБЗОРЫ И РЕФЕРАТЫ ПО МАТЕРИАЛАМ ИНОСТРАННОЙ ПЕЧАТИ)

Самолет Боинг 787	1
Выработка концепции	5
Разработка проекта	15
Летные испытания	57
Начало поставок и первый опыт эксплуатации	63
Модификации	75

УДК 629.735.33-4(73)

А. А. ФИРСОВ

САМОЛЕТ БОИНГ 787

В начале 1990-х годов перспективные работы компании «Боинг» были связаны с разработкой пассажирских самолетов большой вместимости. Побудительным мотивом стало предложение главы авиакомпании «Юнайтед Эйрлайнз» Стефано Вольфа разработать для них самолет с числом мест более 600 для трансатлантических маршрутов. Проект получил условное обозначение N650. Предполагалось, что подобное воздушное судно (ВС) удовлетворит быстро растущие потребности перевозок в Азиатско-Тихоокеанском регионе (АТР) на дальних маршрутах в Северную Америку и Европу. В течение пяти лет работы компания «Боинг» рассмотрела сотни возможных вариантов: от удлиненной модификации самолета Боинг 747 до самолета взлетной массой 700 т и с размахом крыла 90 м, способного перевозить до 750 пассажиров в трехклассной компоновке салона.

Первые же оценки показали, что проект получается очень дорогим. В результате в конце 1992 г. было решено вступить в кооперацию с концерном «Эрбас» для создания совместного проекта, получившего обозначение VLCT («Очень большой коммерческий самолет»). Однако в июле 1995 г. альянс распался, так как представители компаний не смогли прийти к общему знаменателю: компания «Боинг» сделала ставку на проекты модернизации самолета Боинг 747 (747-500X/747-600X), а концерн «Эрбас» — на проект А3XX, позже превратившийся в хорошо известный сегодня самолет А380.

Еще около года компания «Боинг» проектировала модификацию самолета Боинг 747 с использованием прогрессивных решений и технологий, отработанных на ВС Боинг 777. Однако стоимость работ стремительно возрастала: создание нового самолета оценивалось уже в 7 млрд долл. при цене одного самолета 230 млн долл. (в ценах



Проект самолета NLA для авиакомпании «Юнайтед Эрлайнз»



Проект VLCT (рисунок)



Модели самолетов Боинг 747-600X и -400X



Проект самолета A3XX

2001 г.). Каждый день проектных работ обходился в 3 млн долл. К тому времени у компании «Боинг» появились новые прогнозы развития рынка перевозок в АТР, которые показали «дроб-

ление» маршрутов на более мелкие, чей трафик уже не требовал использования «суперлайнеров».

15 декабря 1996 г. компания «Боинг» и корпорация «МакДоннелл-Дуглас» объединились в единую авиастроительную фирму под руководством директора Фила Кондита. В январе 1997 г. все работы по проектированию вариантов самолета Боинг 747 (-500, -600) были приостановлены.

Одним из результатов работы над проектами Боинг 747-500 и Боинг 747-600 стала интересная тенденция сокращения размеров и массы. Это так называемое «циклическое уменьшение размеров»: использование композиционных материалов обещало снижение массы самолета, что в свою очередь требовало применения менее мощных двигателей, а это вело к экономии топлива и, соответственно, еще большему сокращению размеров. Кроме того, резкий рост стоимости новых разработок заставил компанию «Боинг» капитально пересмотреть подходы к общему проектированию. Новые требования вылились в объемный документ ACPS («Стратегические принципы разработки самолетов»), предусматривающий снижение стоимости работ за счет применения новых материалов и процессов.

Работы по внедрению новых стандартов проектирования возглавил главный инженер компании «Боинг» Вольг Жиллет, который в свое время успешно провел модернизацию самолета Боинг 737 при переходе к двигателям с высокой степенью двухконтурности (от модели 737-200 к 737-300) и принимал участие в создании дальнемагистрального самолета Боинг 777. Получив под свое руководство около 110 инженеров и 50 чел. из вспомогательных служб, объединен-

ных в группу ACPS, В. Жиллет должен был решить непростую задачу сокращения, по крайней мере наполовину, сроков и стоимости разработки и запуска в производство нового воздушного судна. Руководство компании «Боинг» полагало, что планируемые затраты на разработку нового самолета потребуют слишком большого срока окупаемости. Основные предложения, выработанные группой В. Жиллета, касались стандартизации применяемых в производстве процессов, оснастки, перевода максимально возможного объема информации на цифровые носители, использования крупноблочной сборки из уже скомплексированных секций, поставляемых субподрядчиками по отлаженным и сертифицированным технологиям.

В. Жиллет поставил субподрядчикам условие, что если они хотят участвовать в производстве нового самолета и быть единственными поставщиками, то должны найти возможность сократить сроки и стоимость изготовления узлов и агрегатов. Девизом, выдвинутым В. Жиллетом, стали слова «один за десять», что подразумевало разработку нового проекта за один год при общей стоимости производственного цикла не более 10 млрд долл.

Тем временем работы по будущему самолету Боинг 787 шли в специально созданной группе LAPD («Разработка нового большого самолета»), правда, в условиях очень ограниченного финансирования, так как все фонды «пожирали» многочисленные проекты модернизации существующих воздушных судов.

Одновременно с созданием группы ACPS руководство компании «Боинг» (после выпуска самолетов Боинг 777 и Боинг 737 нового поколения) пересмотрело модельный ряд и наметило пути его развития. Эти планы реализовались в выпуске модификаций 737-800/900, 757-300, 747-400ER и 767-400ER, а также в создании новых моделей: 777-300ER и 777-200LR. При этом еще осуществлялось сопровождение самолета Боинг 717-200.

Широкий фронт работы одновременно по семи-восьми проектам не мог не привести к определенному накоплению «усталости», что и вылилось в кризисе компании «Боинг» в конце 1997 г. Тогда одновременно застопорился процесс сертификации самолета Боинг 737-700 и произошел сбой на сборочной линии самолетов Боинг 747-400 из-за недостаточных объемов производства комплектующих. В результате списания по итогам года 2.6 млрд долл. убытков про-



Вольт Жиллет



Элен Мюлели

изошел обвал акций фирмы с последующим увольнением в течение года более 12 000 сотрудников.

В качестве «кризисного менеджера» вице-президентом фирмы по коммерческой авиации был назначен Элен Мюлели, перешедший из оборонного подразделения. Именно он стал главным идеологом применения максимального числа инновационных технологий при создании нового самолета. Позже, в 2001 г., его назначили управляющим директором компании «Боинг».

В условиях недостатка средств встал вопрос о финансировании новых проектов, так как без них у фирмы не было будущего. Новый подход к организации работ предложил коммерческий директор компании «Боинг» Стюарт Бучен. Было решено сделать ставку на субподрядчиков, которые должны были самостоятельно проводить проектно-конструкторские работы по своим



Фил Кондит

узлам и системам и финансировать их за свой счет. Фактически проектно-конструкторские работы по многим комплектующим самолета переводились на аутсорсинг. В целом по похожей схеме уже работали фирмы «Бомбардье», «Эмбрайер» и «Ханиуэлл». В условиях прошедших сокращений требовалось также привлечь дополнительный инженерный персонал в группу конструкторов LAPD. Для этого с давним партнером по программе самолетов Боинг 767 и 777 компанией «Мицубиси Хэви Индастриз» (МН) было заключено соглашение о выделении 12 инженеров.

В феврале 2000 г. на фоне потрясшей компанию «Боинг» забастовки, организованной профсоюзом инженеров аэрокосмической отрасли, группу LAPD объединили с исследовательской группой по «малым» самолетам NSA (бывшее подразделение корпорации «МакДоннелл-Дуглас», уже имевшее опыт проектирования с помощью аутсорсинга пассажирского самолета MD-95 — будущего Боинг 717). Вместе с группой ACPS они образовали подразделение по проектированию и планированию производства PS&D или PD.

Пока компанию «Боинг» сотрясала забастовка, концерн «Эрбас» ошутимо вырывался вперед, у него выстраивалась логичная линейка воздушных судов разной размерности A320 — A330/340 — A380.

В таких условиях группа PD предложила сократить продуктовую линейку компании «Боинг» с шести до четырех основных «платформ»: от P-1 до P-4, объединенных общими системами и оборудованием, как и требовали «принципы ACPS». За основу планировалось взять компоненты самолета Боинг 777, «масштабируя» их под конкретную модель ВС. «Плат-

форма» P-1 должна была охватывать нижний ряд магистральных самолетов на 100—200 мест, сменив самолеты Боинг 717, 737 и 757; P-2 представляла собой магистральный самолет на 180—300 мест; P-3 — ВС на 300—400 мест в классе самолета Боинг 777 и «нижнего ряда» семейства Боинг 747; P-4 — должна была сменить «верхний ряд» самолетов Боинг 747. Концепция «платформ» получила обозначение «Проект 20XX».

Проблемой оказалось быстрое старение решений, реализованных на самолете Боинг 777. Рынок требовал большего комфорта для пассажиров и увеличения дальности полета, а также возможности использования стандартных контейнеров LD-3. Особенно это было заметно в классе среднемагистральных ВС, где Боинг 767 быстро терял популярность на фоне самолета A330-200. Требовались радикальные решения, инициатором которых стала главный инженер перспективных разработок Дуэйн Джексон, предложившая концепцию самолета с улучшенной на 20% топливной эффективностью и со сниженными на 10% эксплуатационными расходами.

В основу концепции было положено использование крыла из композитных материалов (КМ). Д. Джексон предлагала построить на базе самолета Боинг 737 самолет-демонстратор с композитным крылом и разработать цельнокомпозитный фюзеляж, собранный из отдельных панелей. К работе Д. Джексон была подключена группа «Фантом Уокс», бывшее подразделение корпорации «МакДоннелл-Дуглас» по перспективным самолетам, имевшее в своем составе специалистов по конструкциям из КМ. На тот момент композиты только-только начинали использоваться в крупногабаритных узлах в боевой авиации и практически еще широко не применялись в коммерческой авиации. Поэтому для запуска проекта потребовалось одобрение руководства на самом высоком уровне (президента компании «Боинг» Фила Кондита и его заместителя по коммерческой авиации Элена Мюлели).

В результате было принято решение разработать в течение трех месяцев проект, просчитать его аэродинамику, конструкцию, общую схему и эксплуатационные характеристики. Так называемый «90-дневный проект» создавался в содружестве с подразделением «Фантом Уокс» и группой PD. Приоритет отдавали «платформе» P-2 (самолету средней вместимости для замены ВС Боинг 767).

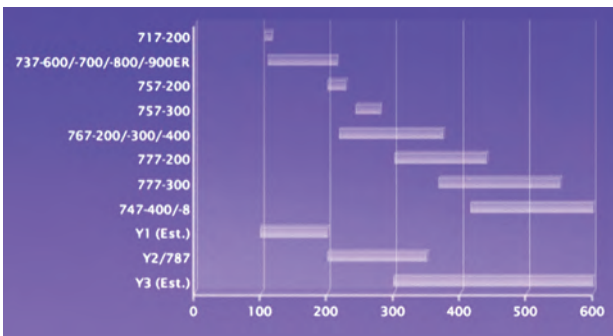
ВЫРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ

В основу расчетов «платформы» Р-2 были положены три проекта: «Глейсер», «Редвуд» и «Еллоустоун». Проект «Глейсер» представлял собой околосвуковой самолет (будущий «Соник Круизер»), «Редвуд» — самолет по компоновке, близкой к схеме «летающее крыло» (проект разрабатывался еще в корпорации «МакДоннелл-Дуглас»), а «Еллоустоун» — дальнейшее развитие компоновки самолета Боинг 777 с крейсерской скоростью, соответствующей числу $M = 0.8$. Такой широкий охват компоновок требовался, чтобы убедиться, что ни одно перспективное направление в авиации не было не охвачено.

Наибольшие сомнения вызывала схема «летающее крыло», так как было непонятно, как воспримут пассажиры самолет без иллюминаторов. К тому же могли возникнуть проблемы с эвакуационными люками. Зато, по расчетам подразделения «Фантом Уокс», применение схемы «летающее крыло» обещало сокращение эксплуатационных расходов сразу на 20% по сравнению с расходами самолетов 1990-х годов и повышение топливной эффективности на 30%.

Тем не менее основная ставка во время «90-дневного проектирования» была сделана на проект «Еллоустоун». Собственно работы и стали называться «Y-исследования» (от слова Yellowstone). Постепенно название «платформы» Р-2 трансформировалось в Y-2. Соответственно проект Р-1 (для замены ВС Боинг 737) стал называться Y-1, а Р-3 (на смену ВС Боинг 777) — Y-3. Проект «платформы» Р-4 уже не рассматривался, вместо него предполагалось создать удлиненный вариант самолета Боинг 747 (будущий 747-8).

Результаты работы по проекту «Еллоустоун» оказались впечатляющими: самолет получался легким, дешевым в эксплуатации, с высокой экономической эффективностью.



Пассажироместимость существовавших самолетов и проектов Y

U.S. Patent Jun. 10, 2003 Sheet 11 of 19 US 6,575,406 E

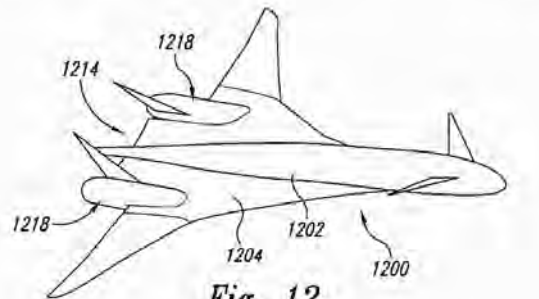


Fig. 12

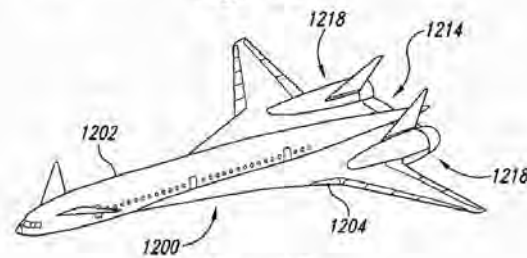


Fig. 13

U.S. Patent Jun. 10, 2003 Sheet 12 of 19 US 6,575,406 B2

CHARACTERISTIC DATA TABLE				
GEOMETRY	WING	VERT. TAIL	HORIZ. TAIL	CANARD
AREA - EFFECTIVE SQFT.	8803.7	224.3 each	305.6	316.0
ASPECT RATIO	3.089	1.792	4.40	4.356
TAPER RATIO	1.00	0.107	1.00	0.146
SWEEP LE DEG. (TRAP)	40.1	48.8	0.0	49.5
DIHEDRAL - DEG.	0	12.2	0	21.45
ROOT CHORD (TRAP) - IN.	1831.56	242.56	100.0	178.4
TIP CHORD - IN.	102.06	26.00	100.0	26.00
M.A.C. - IN. (TRAP)	1045.3	163.39	100.0	121.16
SPAN - IN.	1978.8	240.57	440.0	445.2
TAIL ARM - IN.	-	673.81	823.8	1635.6

Fig. 14

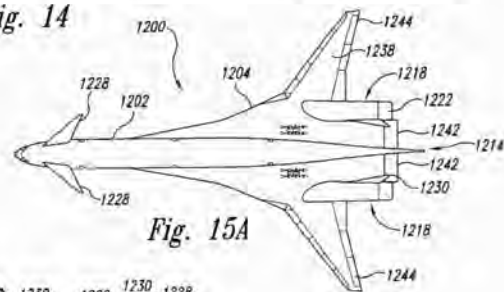


Fig. 15A

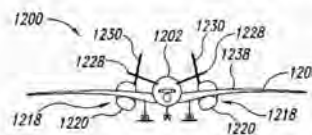


Fig. 15B

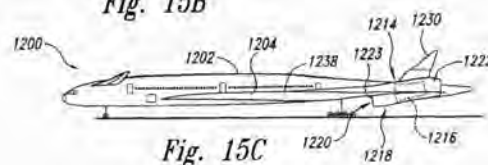
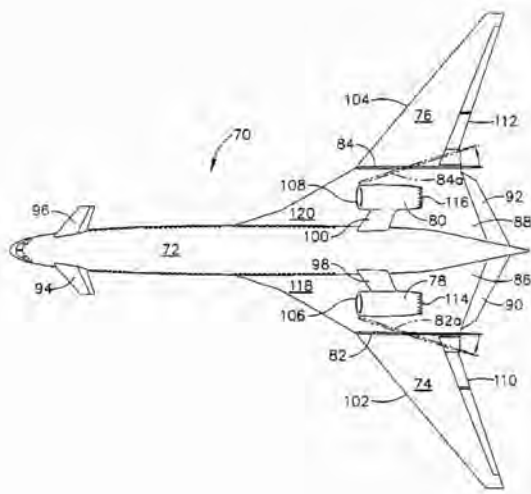


Fig. 15C

Рисунки из патента № 6575406 B2 (выдан 10 июля 2003 г., заявка подана 19 января 2001 г.)



Тема самолета «Соник Круизер» в дальнейшем получила развитие в патенте № 8016233 В2 (выдан 13 сентября 2011 г.)

Что касается проекта «Глейсер», то, хотя работы проводились в обстановке повышенной секретности, в январе 2001 г. газета «Уолл Стрит Джорнал» заявила о существовании патента компании «Боинг» на проект околозвукового самолета. Проект «Глейсер» был разработан небольшой командой, имевшей до этого опыт (совместно с NASA) создания перспективного сверхзвукового ($M = 1.5$) пассажирского самолета HSCT (300 мест). Хотя проект HSCT закрыли в 1999 г., на его основе группа конструкторов создала вариант Y-2, рассчитанный на полет с трансзвуковой скоростью, соответствующей числу $M = 0.98$. В целом проект «Глейсер» рассматривался скорее как исследовательская работа для оценки перспектив максимального использования достижений аэродинамики, не привязываясь к традиционной компоновке пассажирских ВС. На компоновку самолета по проекту «Глейсер» двум инженерам фирмы был выдан внутренний патент, который через два дня и стал известен газете «Уолл Стрит Джорнал».

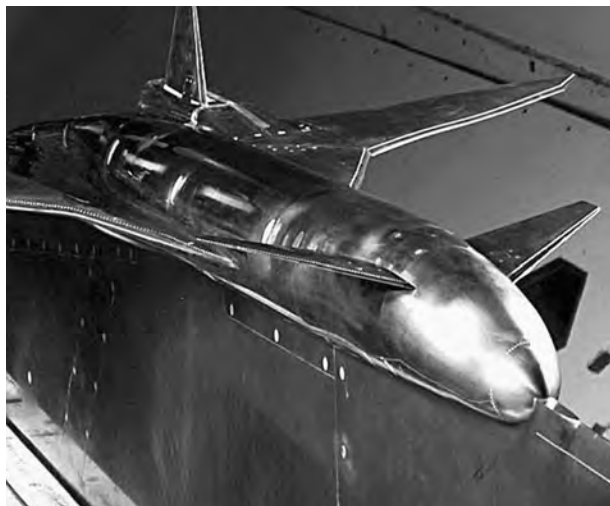
На следующий день после появления газетного сообщения о проекте «Глейсер» Ф. Кондит объявил о планах создания нового поколения самолетов «20XX», которые должны были прийти на смену ВС Боинг 757/767. Так как информация по проекту «Глейсер» приобрела большую известность в авиационных кругах, представители компании «Боинг» были вынуждены срочно провести тур по штаб-квартирам основных авиаперевозчиков для ознакомления с моделью самолета и предварительными расчетами. Проект

получил обозначение «Соник Круизер» и позиционировался в классе ВС Боинг 767-200 с пассажироместимостью до 225 чел. Длина самолета должна была составлять 65 м, взлетная масса — 200 т, число М с двигателями на базе силовой установки самолета 777 — 0.98. При этом время перелета из Нью-Йорка в Париж сокращалось на 2 ч, а на транстихоокеанском маршруте — на 3 ч. Практически все авиакомпании первоначально с энтузиазмом восприняли проект, считая, что он откроет новую эру в авиаперевозках.

Официально старт программы «Соник Круизер» был дан в марте 2001 г. В документах самолет обозначался как «околозвуковой самолет», построенный в соответствии с правилом площадей Сирса — Хаака. Первый был аэродинамиком на фирме «Нортроп» и проектировал «летающие крылья», а второй — математиком, известным своим расчетом снайперских пуль с пониженным воздушным сопротивлением.

С точки зрения современной аэродинамики наиболее выгодным для снижения волнового сопротивления является сигарообразная форма. Но на трансзвуковых скоростях воздушный поток, огибающий самолет такой формы, разгоняется до сверхзвуковых скоростей, вызывая ударные волны, которые резко увеличивают волновое сопротивление. Чтобы снизить его на околозвуковых скоростях, используется такое распределение сечений, когда их площадь напоминает «тело» Сирса — Хаака.

До этого наиболее скоростным американским самолетом был Конвэр CV-990. Он развивал скорость до $M = 0.91$ и считался одним из самых быстрых ВС в мире. Особенностью его



Продувочная модель самолета «Соник Круизер»



Внешний облик самолета «Соник Круизер», использованный в рекламной кампании

аэродинамики было использование специальных бульбовидных обтекателей на задней кромке крыла — так называемых «морковок Кичмена», названных в честь главного конструктора самолета, которые снижали образование ударных сверхзвуковых волн.

Конструкторы компании «Боинг» выбрали для своего самолета «Соник Круизер» идеальную с точки зрения теории Сирса — Хаака схему «бесхвостка» с дельтавидным крылом и полупотопленными в него гондолами двигателей. С первого взгляда казалось, что самолет спроектирован для полетов на скоростях, соответствующих $M = 1.6$ — 1.8 . Один из его конструкторов сказал: «Такое впечатление было, что вме-

сто того, чтобы увеличить скорость медленного самолета, мы снизили скорость более быстрого».

Продувки в аэродинамической трубе показали нормальное поведение самолета до скорости, соответствующей $M = 1.08$. По результатам продувок передний дестабилизатор был сдвинут чуть назад, а вертикальное оперение разнесено



Модель самолета «Соник Круизер», демонстрировавшаяся на выставке МАКС-2001

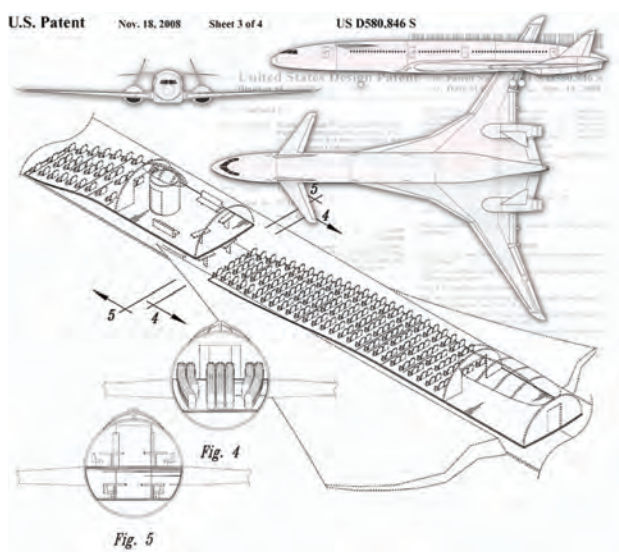


Модель самолета «Соник Круизер» на выставке в Чжухае в 2002 г. Заметно, что угол поперечного V переднего оперения уменьшился почти до 0

по крылу и сдвинуто вперед. Проблему вызвали длинные воздухозаборники, так как они снижали взлетную тягу почти на 10%, что делало недостаточным использование двигателей от самолета Боинг 777, как планировалось ранее.

Вопрос возник и о размерах самолета — проводились расчеты вариантов с числом мест от 100 до 300. Хотя авиалинии высказывались за 300-местный самолет, компания «Боинг» остановилась на варианте в классе самолета Боинг 767 (250 мест). Дальность полета должна была составлять 16 000 км, что позволяло на маршруте Лос-Анджелес — Сингапур экономить 3 ч времени по сравнению с самолетом Боинг 747.

Для будущего самолета Боинг 787 важной особенностью проекта «Соник Круизер» стало первое упоминание о возможности использова-



Рисунки из патента № D580846S, выданного 18 ноября 2008 г.

ния композитных материалов в конструкции фюзеляжа. Кроме того, В. Жиллет впервые выдвинул требование максимально внедрить электроприводы в системы самолета. Фактически уже тогда конструкторы вставляли на путь применения технологий, ставших ключевыми при создании самолета Боинг 787.

Тем временем реакция некоторых авиаперевозчиков на проект «Соник Круизер» стала более критической. Некоторые компании — «Вирджиния Эрлайнз», «Эр Канада», «Сингапур Эрлайнз» — проявляли большой интерес, рассчитывая увеличить «оборачиваемость» самолетов на дальних маршрутах. Помимо экономии времени перелета «Соник Круизер» за счет отсутствия промежуточных дозаправок должен был находиться в воздухе на 25% дольше обычных самолетов в течение года эксплуатации. Еще одним его плюсом была ощутимо возросшая скороподъемность по сравнению со скороподъемностью ВС Боинг 777 при занятии эшелона, что обещало дополнительную экономию топлива. Но ряд авиакомпаний сомневался, что этот самолет «способен радикально изменить мировые воздушные перевозки». В результате сам В. Жиллет в 2001 г. заявил по этому поводу: «Не дело «Боинга» создавать самолеты, которые нравятся только ему самому. Именно поэтому мы собираемся опросить авиалинии, что им нужно...».

Первые серьезные проблемы возникли после парижского авиасалона 2001 г., когда комиссар Европейского агентства по охране окружающей среды Маргет Уоллстром в открытом письме компании «Боинг» высказалась в том плане, что рост эмиссии парниковых газов и вклад в это авиаперевозок требует думать не о повышении скорости полета, а о повышении топливной эффективности и использовании альтернативных источников топлива.

Анализ рынка авиаперевозок, проводимый компанией «Боинг», в свою очередь показывал снижение доли бизнес-класса и одновременный рост интереса к лоукостерам типа авиакомпании «Джетблю», а также к традиционным «бюджетным» перевозчикам, например авиакомпании «Союзвест». «Бюджетники» уже заметно теснили рынок традиционных авиакомпаний, а тут грянул теракт 11 сентября 2001 г. с последующим кризисом авиаперевозок, поставившим последних вообще на грань выживания.

Кризис начался в Северной Америке, а потом распространился на Европу. Теперь авиа-

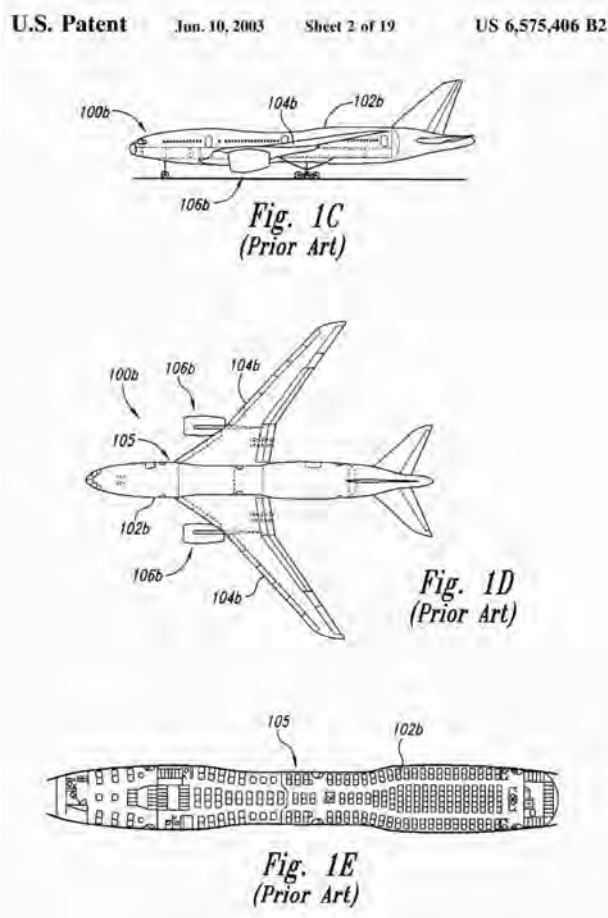
компания стали делать ставку не на скорость и дальность полета, а на экономичность и безопасность перевозок. Правда, интерес к проекту «Соник Круизер» сохраняли некоторые авиакомпании Азии и Ближнего Востока, поэтому руководство компании «Боинг» старалось «подогреть» его. В частности, было объявлено: по результатам продувок самолет вполне может выходить на сверхзвуковую скорость (до $M = 1.08$), планируется применить новые методы компьютерного моделирования аэродинамики самолета, более дешевые конструкционные материалы, системы с лучшей эффективностью и более экономичные двигатели. По словам В. Жиллета, для сокращения расхода топлива компания «Боинг» будет прорабатывать вопрос о возможности сборки самолета из композитных секций.

Действительно, в середине 2001 г. руководство компании «Боинг» в обстановке секретности посетило завод компании «Рейтеон» в Канзасе — пионера в освоении крупных композитных конструкций в самолетостроении. Завод произвел сильное впечатление на В. Жиллета: «...самое главное, мы убедились в том, что кто-то знает, как это делать!».

Используя опыт работ по созданию ВС Боинг 777, компания «Боинг» составила график разработки и запуска в производство самолета «Соник Круизер»: начало конструкторских работ — 2002 г., начало сборки — 2005 г., выкатка самолета — 2006 г., первый полет — декабрь 2006 г., сертификация — декабрь 2007 г., первая поставка авиакомпании — январь 2008 г.

В апреле 2002 г. компания «Боинг» провела очередную встречу с представителями 15-ти авиакомпаний. На этой встрече мнения различных авиакомпаний по поводу проекта «Соник Круизер» и его эксплуатации разделились. «Они летали 50 лет на скорости $M = 0.8$ и теперь не могут понять, что им даст 15%-ная прибавка скорости и как лучше вписать такой самолет в сложившуюся систему авиaperевозок», — отмечал позже В. Жиллет.

Кроме того, на обсуждение были представлены альтернативные проекты. Например, вариант самолета «Соник Круизер» классической компоновки с нормальным хвостовым оперением. Правда, при этом терялось главное преимущество схемы «утка» — постоянное сечение фюзеляжа, так как для достижения трансзвуковой скорости при классической компоновке фюзеляж требовалось «поджать» по правилу площадей.



Рисунки самолета классической компоновки из патента № 6575406 В2

Помимо проработки альтернативных компоновок самолета «Соник Круизер» продолжал развиваться и проект «Еллоустоун». Но конструкторы его использовали лишь для доказательства преимуществ самолета «Соник Круизер» над ВС классической компоновки класса Боинг 767. При демонстрации схем и диаграмм по проекту «Соник Круизер» для сравнения часто включались данные и по проекту «Еллоустоун». Но практически всегда возникали дебаты: что было бы, если бы второй самолет удалось реализовать на практике. Причем характеристики ВС по проекту «Еллоустоун» получались даже несколько выше, чем позже у самолета Боинг 787. Не удивительно, что при обсуждении будущих характеристик самолета «Соник Круизер» представители авиакомпаний все чаще стали задавать вопросы по проекту «Еллоустоун», а представителям компании «Боинг» приходилось все чаще объяснять, что это «сравнительный самолет» и что он не планируется к производству, а предназначен только для



Внешний облик самолета «Соник Круизер»

лучшего понимания преимуществ проекта «Соник Круизер».

Перелом во взглядах авиаперевозчиков на будущее ВС отразился в замечании В. Жиллета на авиасалоне в Фарнборо (2002 г.): «Мы, конечно, не обособленная частная лавочка и работаем с конкретными заказчиками под требования рынка. Если этот рынок требует от нас обычный самолет с технологиями «Соник Круизер», то необходимо отметить, что хотя самолет традиционной компоновки получится чуть более экономичным, при нынешней цене на топливо это не играет сейчас главной роли...».

Дело даже не в том, что начавшийся уже тогда рост цен на топливо заставлял авиакомпанию думать об экономии, а в том, что они плохо представляли, как впишется более скоростное ВС в сетку полетов и существующую инфраструктуру. Компании «Боинг» пришлось даже создать специальную «сетевую аналитическую группу», чтобы просчитать для перевозчиков все выгоды от внедрения самолетов «Соник Круизер»: экономию на зарплате экипажей, варианты обеспечения обслуживания при сокращенном времени прибытия и пр.

К сентябрю 2002 г., когда стал очевиден спад интереса авиакомпаний к проекту «Соник Круизер», компания «Боинг» стала готовить очередное совещание, где решила поставить вопрос ребром: скорость или эффективность? Практически анонимный опрос представителей авиакомпаний в октябре 2002 г. показал, что никто не отдал предпочтение трансзвуковому самолету, все выбрали ВС типа Боинг 767 со снижением расхода топлива на 20%. «Нам только оставалось

принять их выбор», — отметил позже представитель компании «Боинг».

Месяц спустя на съезде Общества инженеров автомобильной и авиакосмической отраслей В. Жиллет впервые продемонстрировал (на слайдах) внешний облик мифического «сравнительного самолета», окрещенного теперь «сверхэффективным». Самолет казался для непосвященных обычной «трубой с крыльями» и был похож на самолеты Боинг 767 и 777. Но главное его отличие от предшественников — это использование всех тех технологий, которые планировалось использовать при создании самолета «Соник Круизер»: расширенное применение электрических систем, новейших композитных материалов, «кабины пилотов будущего» и отсутствие отбора воздуха от компрессоров двигателей. Особо подчеркивалось, что самолет может быть создан в сжатые сроки и способен начать летать уже с 2008 г., а ставка на максимальную эффективность гарантировала успех на рынке.

Девиз нового самолета, ранее звучавший как «быстрее, выше и дальше», сменился на «быстрее, лучше и дешевле», что больше соответствовало тогда потребности авиакомпаний во всемерной экономии. А то, что компоновка самолета стала классической, опять же хорошо принималось высшим руководством основных заказчиков. Правда, технологическая цепочка, выбранная для работы в режиме «быстрее, выше и дальше», сохранилась.

В начале 2003 г. проект получил обозначение 7E7, где «Е» означало «эффективность». Это была дань традиции в обозначении предыдущих



Внешний облик самолета 7E7

самолетов: 7N7 — ставший 757, 7X7 — 777, а 7J7 — нереализованный совместный проект с Японией. На данном этапе рассматривались два варианта: на 210 и 250 мест в трехклассной компоновке салона, имеющие дальность полета 13 000 и 14 500 км при крейсерской скорости, соответствующей числу $M = 0.85$.

Было решено использовать традиционное для самолетов компании «Боинг» двухобъемное сечение фюзеляжа вместо круглого, впервые использованного на самолете Боинг 777. Не в последнюю очередь это было связано с меньшей вместимостью самолета 7E7 по сравнению с вместимостью BC 777.

В феврале 2003 г. авиакомпаниям представили два проекта: 7E7-300 и 7E7-400. Модель «300» должна была перевозить 228 пассажиров (в трехклассной компоновке салона) на расстояние 14 250 км, а модель «400» — 268 пассажиров на расстояние 13 000 км. При этом удельный расход топлива предполагалось уменьшить на 23% по сравнению с расходом топлива самолета A330-200, а число M полета — увеличить до 0.89.

В марте компания «Боинг» приступила к началу процесса сертификации будущего самолета 7E7 по американским и европейским нормам. Тогда же было принято решение увеличить диаметр пассажирского салона до 5.8 м, сделав его на 0.7 м шире, чем у самолета Боинг 767 (на 0.2 м меньше, чем у самолета Боинг 777), и чуть шире салона самолета A330. Обозначение проектов соответственно изменилось: 7E7 и 7E7STR (удлиненный), но вскоре оно поменялось снова:

7E7SR (меньшая дальность) для удлиненного варианта и 7E7LR (увеличенная дальность) для базового. Все эти маневры со сменой названия были призваны привлечь новых заказчиков, часть из которых настаивала на самолете с дальностью полета 8400—16 800 км, а часть — на самолете средней дальности (7000—8400 км) с компоновкой салона на 250—350 пассажиров.

В итоге, чтобы удовлетворить все эти требования, были предложены четыре варианта: базовый LR на 200—220 пассажиров в трех классах с дальностью полета 16 000—16 500 км, удлиненный LR на 260 пассажиров с дальностью полета 15 200 км, базовый SR на 320—340 пассажиров в двух классах с дальностью 6500—7000 км и укороченный SR на 280—310 пассажиров с дальностью 8400 км. Несмотря на растущее число вариантов, компания «Боинг» старалась максимально унифицировать их, а чтобы сохранить топливную эффективность для разных вариантов, предлагались довольно радикальные технические решения. Так, размах крыла планировалось менять с использованием различных законцовок: 50 м для SR и 57 м для базовой модели. Столь радикальное решение шло вразрез с провозглашенным девизом компании «Боинг»: «Один самолет — воплощение любой мечты».

Трудным решением 2003 г. стал также выбор завода для финальной сборки. Под влиянием концерна «Эрбас» решили производить сборку из крупных секций, доставляемых воздушным путем с заводов-поставщиков, расположенных не только на территории США, но и за океаном. Опыта управления таким распределенным про-

изводством у компании «Боинг» еще не было. До этого все производство строилось вокруг двух заводов: в Рентоне и Эверетте (шт. Вашингтон). И хотя отдельные крупные секции уже доставлялись водным транспортом или по железной дороге, как, например, фюзеляжи самолетов Боинг 737 из Уичито (шт. Канзас), основная технологическая цепочка не менялась еще со времен Второй мировой войны.

Сборку нового самолета предполагалось полностью перевести на конвейер с подборкой отдельных узлов на нескольких поточных линиях. Впервые подвижную линию конвейера для сборки наладили в Лонг-Бич при производстве самолетов Боинг 717, а потом на конвейерную сборку поставили более крупный самолет Боинг 737 на заводе в Рентоне.

Секции и узлы самолета планировалось получать из Японии и Италии. В январе 2002 г. компания «Боинг» выбрала в качестве партнеров по программе будущего самолета Боинг 787 японские компании МНИ, «Кавасаки» и «Фуджи». В феврале к ним добавились итальянская корпорация «Алениа» и американская компания «Воут» (ныне в качестве подразделения входит в группу «Триумф»), а в марте — австралийская фирма «Хоукер Де Хэвилленд Австралия» (собственность подразделения «Боинг Австралия», с февраля 2009 г. носит название «Боинг Аэростратчче») и подразделение в Уичито.

Руководство компании «Боинг» дало понять, что не прочь перенести сборочное производство из Эверетта куда-нибудь восточнее, подальше от основного забастовочного центра борьбы сотрудников фирмы за свои права. В результате, например, шт. Канзас тут же предложил вложить в производство 500 млн долл., если сборочный завод будет размещен на его территории.

Одновременно возникли проблемы с маркетингом: авиакомпания, увидев после футуристичного самолета «Соник Круизер» обычное пассажирское ВС, проявляли слабый интерес к нему. И хотя в компании «Боинг» хорошо понимали, что под классической компоновкой скрывается принципиально новый самолет, потребовался нестандартный рекламный ход для привлечения внимания.

5 мая 2003 г. компания «Боинг» представила новый облик «идеального» 7Е7, который отличался от всех предыдущих самолетов целым рядом качеств. Внешне проект стал воплощением скорости: от наклоненных окон кабины пило-

тов до «акулевидного» оперения и отклоненных назад законцовок крыла. Опять же с целью рекламы был объявлен всемирный конкурс на выбор названия для нового самолета. Впервые для опроса широко использовался Интернет.

Одновременно к августу 2003 г. предполагалось завершить этап эскизного проектирования, окончательно утвердить требования и концепцию самолета. Планировалось принять решения по выбору материалов, оборудования, требований к инфраструктуре обслуживания и компоновке кабины.

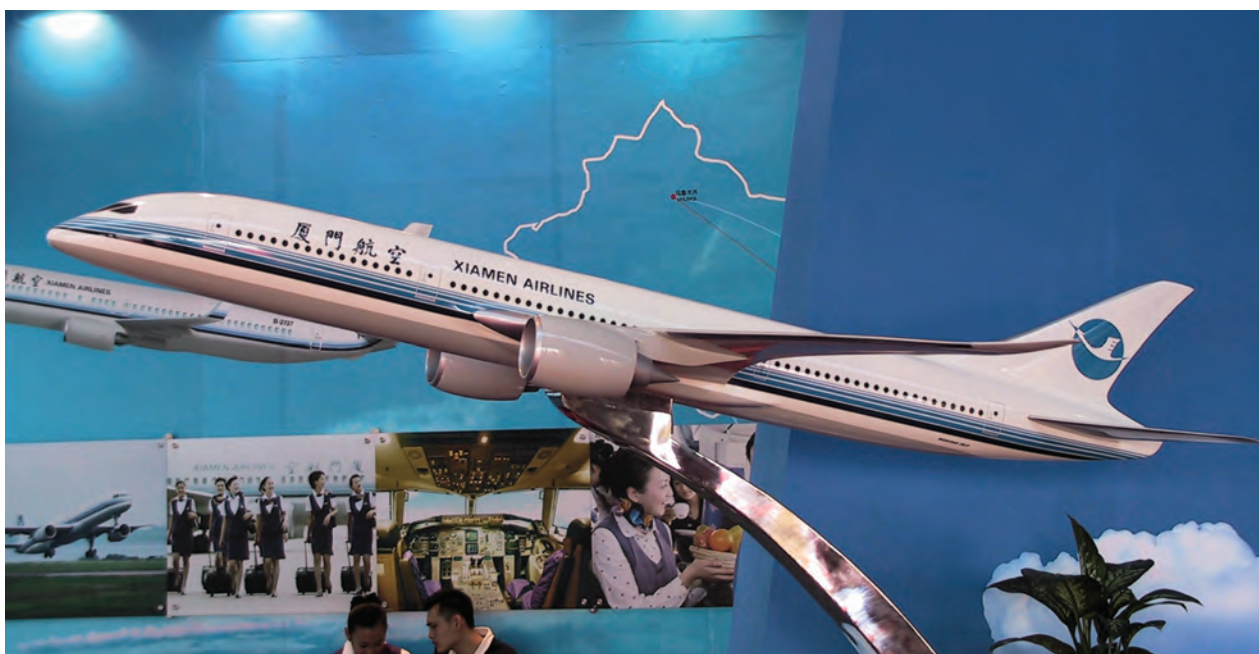
Сложной проблемой стал выбор двигателя. Компания «Боинг» хотела привлечь двух поставщиков, хотя корпорация «Дженерал Электрик» не скрывала, что собиралась стать монополистом в поставках двигателей для самолета 7Е7. Тяга задавалась в пределах 28,5 — 31 т, степень двухконтурности — 9—12, диаметр — 2,95 м.

После завершения эскизного проекта компания «Боинг» планировала к концу 2003 г. предложить самолет авиакомпаниям для заключения контрактов. Приступить к конструкторским работам предполагалось в конце 2004 г., к изготовлению первых узлов — в середине 2005 г., первый полет выполнить в 2007 г., а поставки начать в 2008 г.

Что касается необычного внешнего вида самолета 7Е7, то руководство компании «Боинг» не питало иллюзий, рассматривая это исключительно как рекламный ход. После того как рынок «сдвинулся с места», для объяснения возвращения к классическим формам руководство заявило, что это всего лишь «очередное изменение проекта».

Рынок действительно бурно реагировал на маркетинг 7Е7, а аналитики фирмы стали пророчить объем продаж в 2000—3000 самолетов. Фирма была настолько уверена в успехе нового самолета, что решила свернуть производство самолета предыдущего поколения — Боинг 757. «Экономичность и большая дальность полета позволят организовать прямое сообщение без промежуточных посадок. В результате 7Е7 станет региональным самолетом с межконтинентальной дальностью...», — считали представители компании «Боинг».

Тем временем фирму продолжали сотрясать скандалы. В 2003 г. она впервые в истории отдала первое место среди поставщиков гражданских самолетов концерну «Эрбас». В первой половине 2003 г. разразился «шпионский» скандал, в ходе которого компанию «Боинг» обвинили в исполь-



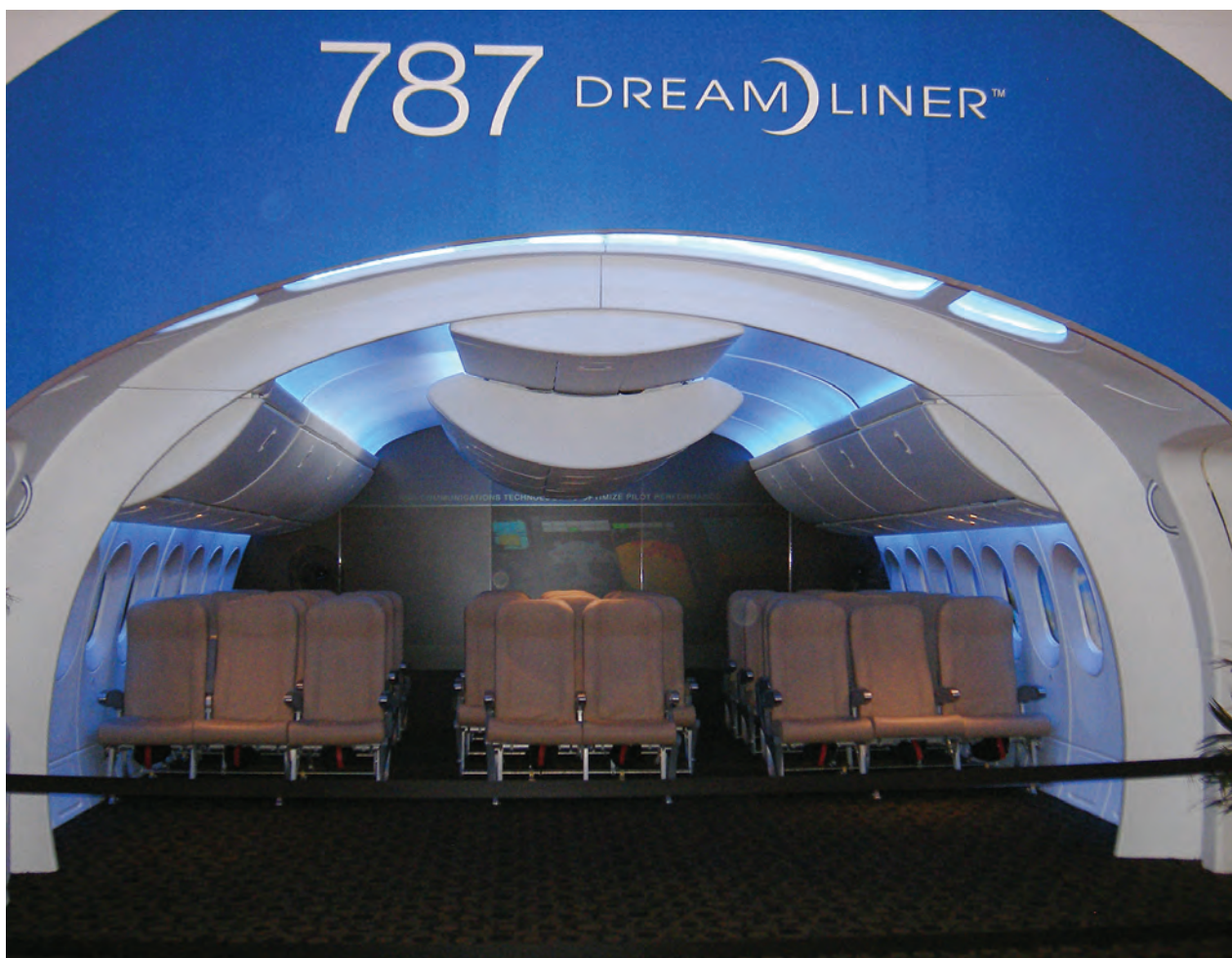
Модель самолета 7E7 на выставке в Пекине в 2003 г.

зовании секретов концерна «Локхид Мартин». Кроме того, пришлось выслушать обвинения в неэтичном лоббировании своих интересов в правительстве США. Эти скандалы вынудили Фила Кондита сначала отправить в отставку нескольких сотрудников из высшего руководства, включая финансового директора Майка Сирса, которого многие называли будущим генеральным директором, а затем и самому подать в отставку. Теперь фирмой «Боинг» стала управлять группа бывших менеджеров корпорации «МакДоннелл-Дуглас», причем пост президента достался Гарри Стоунсайферу, бывшему генеральному директору этой корпорации. В Сиэтле тогда шутили, что корпорация «МакДоннелл-Дуглас», купила компанию «Боинг» на ее же деньги. На заводе же сохранялась предзабастовочная обстановка, так как ходили упорные слухи о переносе производства в другое место.

Смена руководства не повлияла на отношение к самолету 7E7 — проект продолжал рассматриваться «потенциально прорывным». 20 ноября 2003 г. на встрече с представителями 80 авиакомпаний и 8 профильных институтов было объявлено, что «основной целью компании «Боинг» является не только достижение высокой экономичности самолета, но и обеспечение привлекательности с точки зрения цены (для перевозчиков) и внешнего вида (для пассажиров)». Впервые потенциальным покупателям был представлен макет пассажирского салона.

Снижения цены самолета планировалось добиваться путем максимальной унификации комплектующих и сокращения количества субподрядчиков. Так, шасси должна была поставлять только одна фирма, а двигатели — только две. Для комплектации салона вместо 15 поставщиков планировалось оставить 8.

Технологическая цепочка производства самолета 7E7 стала отображением бизнес-модели, использованной корпорацией «МакДоннелл-Дуглас» для производства самолета MD-95, позже превратившегося в Боинг 717. Бизнес-модель RONA («рентабельность чистых активов») определяла, сколько чистой прибыли получается с единицы затраченного труда, а Г. Стоунсайфер был большим поклонником RONA. Соответственно основная политика компании «Боинг» заключалась в сокращении производственных площадей. Планировалось оставить производство киля на заводе в Фредериксоне (шт. Вашингтон), передней секции фюзеляжа — в Канзасе, обтекателей крыла — в Виннипеге (Канада) и закрылков — на фирме «Боинг Аэростратч» в Австралии. Наконец, компания «Боинг» сохраняла за собой финальную сборку. Это составляло 35% общих трудозатрат по самолету. Таким образом, компания фактически выступала в роли «системного интегратора». «В тот момент мы были буквально зациклены на получении максимальной прибыли от проекта 787, хотя теперь понимаем, что нормальный уро-



Макет пассажирского салона самолета 7Е7 на выставке в Пекине в 2003 г.

вень прибыли является отражением нормального ведения бизнеса», — отметил в 2011 г. главный менеджер по самолету Майк Бейр.

Тем временем компания «Боинг» продолжала сокращать свои производственные площади, что не помешало ей к февралю 2005 г. стать крупнейшим производителем авиационной техники. Разработка передней секции фюзеляжа была возложена на подразделение компании «Боинг» в Уичито, уже имевшее опыт работ по программам самолетов 777, 767, 747 и 737. Фирма «Воут» отвечала за производство хвостовых секций фюзеляжа № 47 и 48. Для этого был подготовлен завод площадью 35 400 м² на территории аэропорта в Чарлстоне (шт. Южная Каролина). Корпорация «Аления» отвечала за производство секций № 46 и верхней части секции № 44. В Чарлстоне также было основано совместное (на паритетных началах с корпорацией «Аления») производство площадью 31 000 м² по сборке центральной части фюзеляжа из секции № 43 производства концерна «Кавасаки»

и № 45/11 производства компании «Фуджи» (центроплан с шасси), а также секций № 44 и 46, поставляемых компанией «Аления». Она также отвечала за производство стабилизатора (завод в г. Фоджа, Италия).

Японские партнеры компании «Боинг», являющиеся также главными комплектаторами самолетов Боинг 767 и 777, получили 20 и 15% общего объема производства самолета, что в сумме сделало Японию основным субподрядчиком. Кессон крыла должна была производить компания МНІ. Впервые в истории компании «Боинг» такая ответственная деталь была отдана на аутсорсинг. С учетом завода в Уичито, компания «Боинг» оставила себе только 23% объема работ по плану самолета.

15 декабря 2003 г. состоялся совет директоров, который должен был принять окончательное решение о запуске в производство проекта 7Е7. Дебаты, судя по тому, что на них ушло 4 ч вместо планируемых полутора, были бурными, но положительное решение все же приняли.

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА

Официальный старт программе 7E7 был дан 16 декабря 2003 г. — в честь столетия первого полета самолета братьев Райт. Особенно важным для рабочих, присутствующих на праздновании, стало объявление о том, что для финальной сборки самолета определен завод в Эверетте. Из восьми возможных вариантов он был выбран не в последнюю очередь благодаря поддержке штата Вашингтон, который в виде льгот и инвестиций обещал компании «Боинг» финансовую помощь в 3,2 млрд долл.

Ожидалось, что первым заказчиком нового самолета станет японская авиакомпания JAL, но к моменту официального старта программы она решила отложить заключение договора до середины 2004 г. Другой кандидат, японская же авиакомпания ANA, также проявлял нерешительность. В результате, чтобы сделать свое предложение более привлекательным, компания «Боинг» объявила о снижении стартовой цены до 120 млн долл. Цена ближайшего конкурента — Эрбас А330-200 — составляла 142 млн долл. Одновременно были названы первые комплектаторы: корпорация «Гамильтон» (электрика) и компания «Рокуэл Коллинз» (БРЭО). Сам процесс выбора субподрядчиков затянулся до 2005 г.

В 2004 г. компания «Боинг» объявила о еще одной новинке: силовую установку было решено сделать универсальной, чтобы замена двигателей обоих производителей могла проводиться в течение суток. Одновременно выбрали поставщиков двигателя. Из предложений, представленных компаниями «Дженерал Электрик», «Роллс-Ройс» и «Пратт-Уитни», были выбраны первые два, компания «Пратт-Уитни» осталась не у дел. Сменились и названия модификаций: 7E7SR стала 7E7-3, базовая 7E7 — 7E7-8, а удлиненная 7E7STR — 7E7-9. Цифры в конце названия должны были означать дальность полета: для 7E7-3 — 3500 морских миль (6475 км), а для 7E7-8 — 8500 миль (15 725 км). Правда, дальность полета 7E7-9 была меньше обозначенной — только 8300 миль (15 355 км). Число мест пассажирского салона: 289—300 для 7E7-3, 200—217 — для 7E7-8 и 250—257 — для 7E7-9.

Важное событие произошло 25 апреля 2004 г., когда на пресс-конференции компании «Боинг» было заявлено, что, наконец, подписан первый договор стоимостью 6 млрд долл. на продажу 50 самолетов 7E7 японской авиакомпании ANA. По сумме это был крупнейший стартовый

заказ компании «Боинг». Поставки предполагалось начать в 2008 г. с модели 7E7-8. Спустя шесть месяцев планировалось сертифицировать модель 7E7-3, а в 2010 г. — 7E7-9. Авиакомпания ANA рассчитывала получать с 2008 г. ежегодно по восемь самолетов. Однако уже тогда появились мнения, что оценка темпов первоначально производства слишком оптимистична, — компания «Боинг» в 2008—2009 г. планировала выпустить свыше 90 самолетов. Несостоятельность этих планов стала очевидна только через три года.

Летом 2004 г. было объявлено об очередном серьезном изменении — размах крыла варианта 7E7-8 решили увеличить на 1,2 м (до 60,1 м). Путем последовательного улучшения аэродинамики компания «Боинг» сумела поднять ожидаемую экономию по топливу до 6%. Не последнюю роль в этом играло композитное крыло, которое при том же размахе, что и у самолета Боинг 777, получалось тоньше за счет более прочного кесона.

Постепенно происходил отказ от «дизайнерского» внешнего вида проекта 7E7. Так, остекление кабины пилота из четырех лобовых стекол было заменено на более привычное для компании «Боинг» остекление из шести стекол. Заметной особенностью проекта стали увеличенные на 30% по площади иллюминаторы — результат перехода на композитные материалы, не требующие локального усиления вокруг вырезов в конструкции. Тем не менее использование композитных материалов само по себе не гарантировало снижения массы конструкции. В процессе проектирования она постоянно росла, правда, не так сильно, как в процессе разработки самолета Боинг 777. Дольше всего разработчики держались за «акулообразное» хвостовое оперение, так как менеджмент фирмы требовал сделать внешний облик самолета 7E7 легкоузнаваемым. Однако постепенное уменьшение кривизны кромок оперения привело к полному отказу от этого дизайнерского излишества: механика победила эстетику. В результате к концу лета 2004 г. внешний облик самолета и его аэродинамические характеристики были утверждены для дальнейшего конструирования.

На авиасалоне в Фарнборо летом 2004 г. компания «Боинг» получила еще ряд заказов на самолеты 7E7. Раньше стартовыми заказчиками выступали американские авиакомпании, а теперь



Модель самолета 787 на выставке МАКС-2005

они в основном были из-за океана. Их привлекали комфортабельный салон, рассчитанный на длительные перелеты, низкая стоимость эксплуатации, уменьшение шума на местности, меньший расход топлива и большая дальность полета. В октябре 2004 г. авиакомпания ANA официально выбрала двигатели для своих самолетов 7E7. Ими стали Роллс-Ройс «Трент» 1000, в результате чего впервые для компании «Боинг» производство нового самолета начиналось с двигателями британской фирмы. Не последнюю роль сыграло участие компаний «Кавасаки» и МНН в финансировании и создании этого двигателя. Первая разрабатывала промежуточный компрессор (общий объем участия в проекте 8.5% по стоимости), а вторая — камеру сгорания и турбину низкого давления (7%).

В ноябре 2004 г. состоялась очередная встреча руководства компании «Боинг» с представителями авиакомпаний. На ней были озвучены требования заказчиков, намечены пути стандартиза-



Продувочная модель самолета Боинг 787

ции и упрощения обслуживания самолетов 7E7, а также вопросы финансирования проекта. В частности, компания «Боинг» отметила, что еще одной целью, стоявшей перед разработчиками нового самолета, являлось сокращение сроков его обслуживания на земле. Это должно было привести к значительной экономии средств и стать серьезным аргументом в борьбе с концерном «Эрбас». Так, первый технический контроль (C-check) для самолета 7E7 предполагалось проводить через три года после начала эксплуатации или после выполнения 170 полетов. Для сравнения, ВС Боинг 767-300 он требовался через каждые два полета. Контроль технического состояния самолета 7E7 предстояло возложить на встроенные системы, которые должны были сообщать о технических неполадках и предупреждать о необходимости обслуживания.

К концу 2004 г. компания «Боинг» закончила 75% необходимых продувок в аэродинамической трубе, общий объем продувок составлял 11 000 ч. Общая масса композитов в конструкции постепенно превысила 50%, хотя руководство компании подчеркивало, что большая доля новых материалов — не самоцель.

Начало 2005 г. принесло буквально вал заказов. Авиакомпания JAL заявила о заключении контракта на 30 самолетов с опционом еще на 20. Хотя заказ на самом деле был подписан позже, он дал толчок рынку и следом потянулись другие покупатели. Заказ на 60 самолетов стоимостью 7.2 млрд долл. был заключен с китайскими авиакомпаниями. На церемонии подписания контракта, где присутствовал посол Китая в США, особо подчеркивалось, что китайцы хотели бы получить новый самолет к началу Олимпийских игр 2008 г. В итоге общий объем заказов достиг 186.

После этого логичным стало присвоение проекту очередного номера — 787. К тому же в компании «Боинг» полагали, что цифра «8» в некоторых азиатских странах считается счастливой.

Прорыв на азиатском рынке позволил компании «Боинг» разместить там ряд заказов: руль направления теперь должна была производить китайская фирма «Ченду», а корейская КАИ — задние кромки оперения. Именно на этом этапе компания «Боинг» отказалась от «акульей» формы оперения самолета. Теперь главной особенностью стал большой угол V-образности крыла в полете, явившийся прямым следствием широкого использования композитов. Тонкое крыло самолета 787-8 при размахе 68 м имело удлинение 10 против 8.68 у крыла самолета Боинг 777-200. Но, несмотря на большее удлинение кессона крыла, прочность конструкции осталась той же. Еще одна особенность — использование «шеврона» на задней кромке сопла двигателя, что должно было снизить шум на местности. Это решение уже было опробовано корпорацией «Дженерал Электрик» на двигателях CF34 для региональных самолетов. Предварительно «шеvron» был испытан на самолете Боинг 777.

На рубеже 2004—2005 г. проект пришлось серьезно переработать для снижения взлетной

массы, так как она на 3% превысила первоначальную величину. Кампания по «борьбе за вес» позволила дать экономию 2.5%.

Ключевым аспектом ускорения проектных и производственных работ по созданию самолета стало широкое использование цифровых технологий. Так, только расчеты на суперкомпьютерах «Крей» заняли 650 000 ч — много больше, чем для любого другого самолета, включая первый «цифровой» самолет компании «Боинг» — 777. Причем, если при проектировании самолета Боинг 777 все расчеты потом переводились в бумажные чертежи, то при создании самолета Боинг 787 все чертежи использовались только в электронном виде. Для проектных работ применялся пакет программного обеспечения (ПО) САТІА компании «Дассо Системс», ранее использовавшийся в разработке ВС Боинг 777, но теперь с помощью САТІА проектировали также производственную оснастку, инструменты и даже сопутствующие изделия. Кроме того, цифровой подход к проектированию позволил облегчить кооперацию с поставщиками при распределенной системе производства.

Еще одной новинкой стало использование системы управления жизненным циклом, базирующейся на другом пакете программ компании «Дассо Системс» — ENOVIA. Эта система рас-

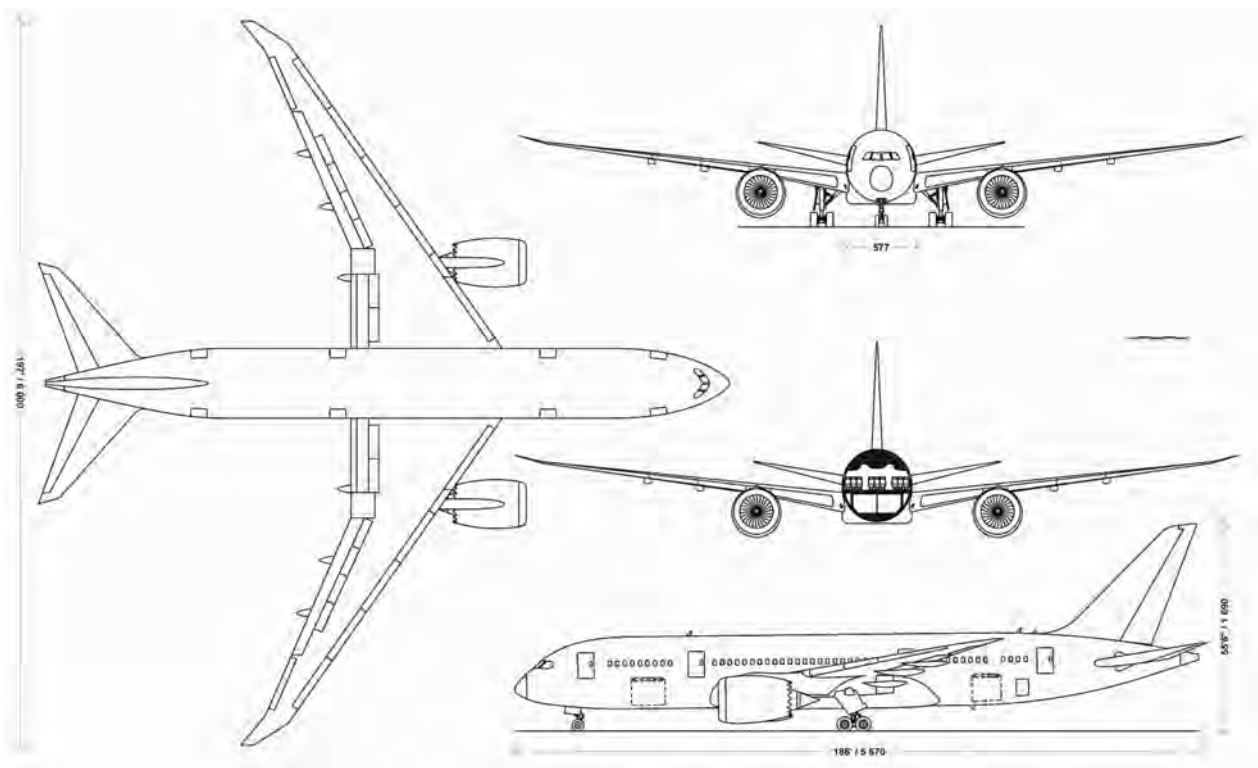
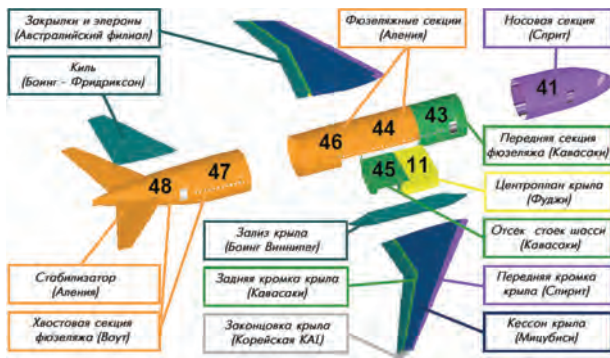


Схема самолета Боинг 787-8



Основные секции самолета Боинг 787

предельной информации обеспечивала субподрядчикам доступ к базам данных 3D моделей деталей, узлов и систем. Еще один пакет — DELMIA — позволял провести виртуальную отработку всего процесса производства и сборки самолета, а также смоделировать процесс продажи, обслуживания и даже утилизации самолетов. Предполагалось, что предварительный процесс моделирования позволит значительно сэкономить на налаживании производства и ускорить запуск нового самолета в серию. Позже, в 2007 г., выяснилось, что и эти надежды не оправдались.

Полученная в 2005 г. математическая 3D модель самолета должна была обеспечить обрат-

ную связь между конструкторами и технологами и теоретически исключить появление узлов и деталей, которые или невозможно изготовить, или производить слишком дорого. Математическая модель самолета также сократила время выверки проекта, позволяя быстро перебирать возможные варианты технических решений.

Предварительное компьютерное моделирование аэродинамики и трехмерное проектирование привели к сокращению объема работ по продувкам крупномасштабных моделей в аэродинамической трубе. Если для самолета Боинг 767 пришлось подготовить свыше 50 вариантов модели крыла, то для самолета Боинг 787 ограничились только 12.

Одновременно началось проектирование систем. Электрооборудование нового самолета было не похоже на то, что использовалось ранее. Помимо распределенного проектирования систем, переданного субпоставщикам, на их же базе проводили тестирование и испытания. Так, электрогенераторы тестировала корпорация «Гамильтон» в Рокфорде (шт. Иллинойс), а испытания отдельных агрегатов и устройств — по всей территории США. В Сиэтле была организована только лаборатория по испытанию авиационного оборудования на летном тренажере.

Bringing the parts together in Everett

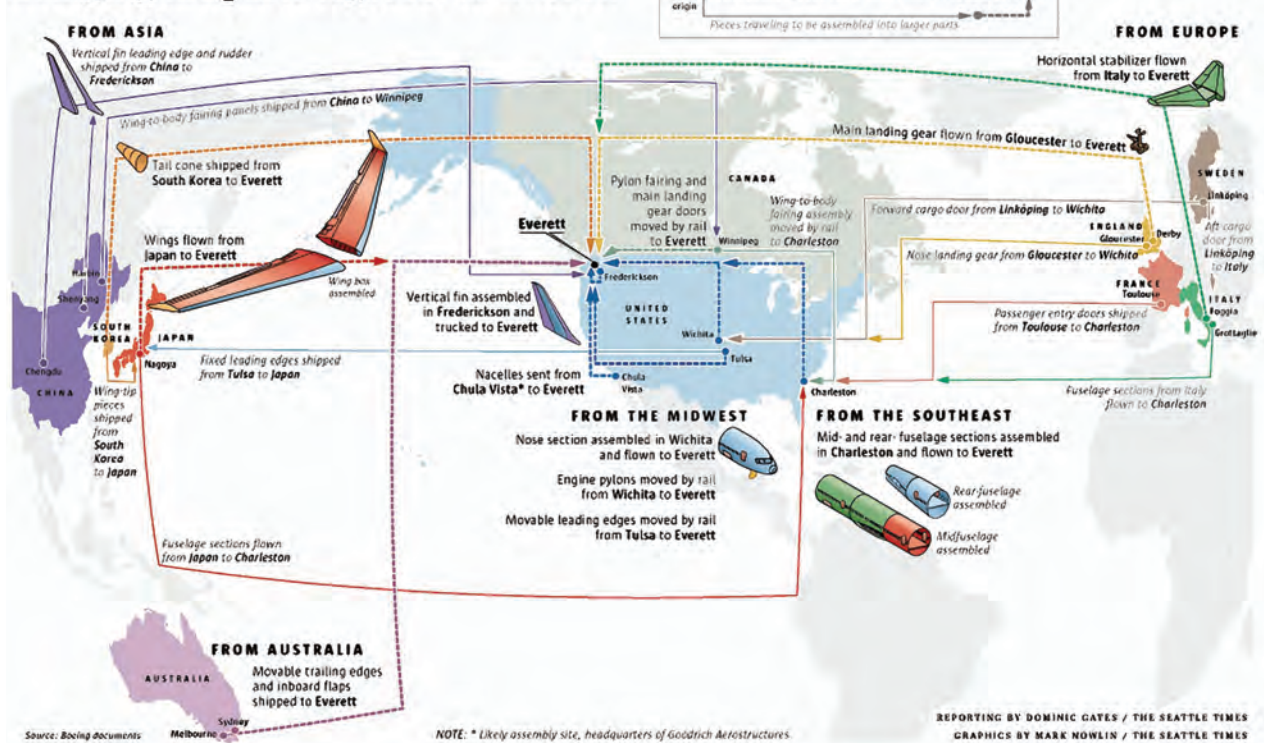


Схема поставок агрегатов на сборочную линию в Эверетте

В апреле 2005 г. удалось сделать прорыв в конкурентной борьбе с только что появившимся проектом A350: главный потребитель продукции концерна «Эрбас» в США — авиакомпания «Нортвест» — выбрал самолет Боинг 787. Эта неудача оказалась для концерна «Эрбас» очень болезненной, так как кабина пилотов и оборудование будущего самолета A350 первоначально создавались именно под требования авиакомпании «Нортвест». К осени 2005 г. число заказов достигло 261, в том числе 118 — твердых, шли переговоры о приобретении еще 400 самолетов Боинг 787. На волне этих успехов руководитель работ по новому самолету В. Жиллет был назначен вице-президентом компании «Боинг», отвечающим за проектирование, производство и связь с партнерами по бизнесу.

Одновременно проходили прочностные испытания композитных секций фюзеляжа: хвостовой № 47, центральной, «бочек» постоянного диаметра № 43—46; разрабатывалась носовая секция № 41. Также были подготовлены кессоны консоли крыла (компания МНП), центроплана («Фуджи») и усиливающие элементы («Кавасаки»). Хотя формально считалось, что крыло изготавливается в Японии, финальную сборку проводили в США, в Эверетте. Там же делали

предкрылки и закрылки. Испытания отдельных элементов самолета проводили на месте производства. Стабилизаторы, например, испытывала корпорация «Аления» в Италии, а киль — завод компании «Боинг» в Фредериксоне (шт. Вашингтон).

По мере готовности планера самолета все большее внимание уделялось оборудованию. Впервые оборудование кабины экипажа было публично представлено в сентябре 2005 г. Основу приборной панели составили пять крупноформатных дисплеев. Дизайн самой кабины напоминал дизайн кабины самолета Боинг 777, что должно было облегчить обучение экипажа и ускорить освоение нового самолета. Принципиальной новинкой стали две системы отображения информации на фоне лобового стекла (компания «Рокуэлл Коллинз»). Корпорация «Гамилтон» готовила стенд для обеспечения дистанционного тестирования оборудования поставщиков.

На этом этапе В. Жиллет отмечал: «Нам удалось сжать время, и мы делаем больше за те же сроки». А времени оставалось все меньше. К концу 2006 г. в Эверетт должны были поступить все секции и узлы для сборки, а уже в середине 2007 г. приступить к испытаниям. Кроме



Цифровой макет кабины экипажа, август 2005 г.



Первая композитная секция, Сиэтл, январь 2005 г.



Сборка киля (компания СМС, март 2007 г.)

того, своей очереди дожидались проекты вариантов Боинг 787-3 и Боинг 787-9, так что для инженерно-технического персонала компании «Боинг» началась настоящая «штормовщина».

В январе 2005 г. в Эверетт прибыла первая композитная секция фюзеляжа, окрашенная в бело-голубой цвет. Приглашенные на мероприятие журналисты должны были засвидетельствовать реальность создания магистрального самолета из композитных материалов. Представляя изделие, В. Жиллет заявил: «Это самое большое в мире цельнокомпозитное изделие, выполненное из напряженных углепластиков». Секция была изготовлена практически по той же технологии, что использовалась фирмой «Рейтеон» для административного самолета «Премьер I»: управляемое компьютером выкладывание пропитанного эпоксидной смолой углепластикового полотна на оправку или форму-изложницу с последующим «сворачиванием» в круглую секцию и помещением в автоклав для полимеризации под давлением.

На представлении секции главный инженер проекта Том Коган сказал: «Это достижение является скорее эволюционным, чем революционным. Мы занимаемся композитами уже 30 лет и не делали чисто композитных самолетов только по причине их высокой стоимости. Но, перейдя на полимеры, мы уже не вернемся к алюминию — он корродирует, подвержен усталости и требует большего внимания».

Несмотря на то что административный самолет «Премьер I» и бомбардировщик В-2А, выполненные с широким использованием композитов, уже находились в эксплуатации, возникали серьезные опасения в возможности сертификации таких изделий для коммерческого применения, особенно в плане усталостной прочности и устойчивости к попаданию молний. В частности, представители концерна «Эрбас» предупреждали авиакомпании, что могут возникнуть проблемы с ремонтом самолетов при повреждении их во время погрузочно-разгрузочных работ багажными контейнерами и наземным оборудованием. Интересно, что концерн «Эрбас» к этому времени стал лидером в использовании композитных конструкций на гражданских самолетах, впервые применив полимерные кессоны для оперения самолета А310-300 в 1985 г. и цельнокомпозитное оперение с напряженной обшивкой из углепластиков на самолетах А320 в 1989 г. В 1993 г. доля композитов в конструкции крыла самолетов А330/340 достигла 13%, а на самолете А380 общая доля полимерных материалов составила 20%.

Использование композитных материалов в США началось в 1950-х годах, когда для МБР «Минитмен» были использованы металло-керамические композиты «эвкойт», а для ракет малой дальности — напряженные углепластики. Первые углеродные нити изготавливались путем нагрева вискозной нити до обугливания. Но так как содержание в них углерода составляло только 20%, эти нити были относительно непрочные. В 1960-х годах стали изготавливать углеродные нити из полиакрилонитрилов, позволявших получить углеродную нить высокого качества с содержанием углерода до 50%.

Само по себе углеродное волокно имеет диаметр от 0.005 до 0.01 мм и состоит в основном из кристаллического углерода. Прочность обеспечивается ориентацией кристаллов углерода вдоль волокна. Из волокон навиваются нити и полотна углепластика, которые необходимы для навивки или выкладывания различных изделий.

Первоначально детали из углепластика были очень дороги и использовались в основном в космической отрасли, пока их не открыла для себя спортивная индустрия. Спортивный инвентарь начали изготавливать из графитового или более дорогого борного волокна.

С конца 1960-х годов стали применяться упроченные углеродные и арамидные волокна, уже предварительно покрытые клеем. В отличие от боросодержащих полимеров такие материалы могли обрабатываться обычным металлическим инструментом и стоили почти в 10 раз дешевле (25 долл. за 1 кг против 200 долл. для боросодержащих полимеров).

Стеклопластиковые полимеры появились в коммерческой авиации в 1960-е годы. Из них выполнялись сотовые наполнители и вспомогательные рулевые поверхности. Первый серьезный топливный кризис середины 1970-х годов заставил NASA обратить более пристальное внимание на композитные конструкции.

Впервые в гражданской авиации крупные конструкции из композитов были сделаны в 1970-х годах на самолете Локхид L-1011 «Тристар» (подкрыльевой обтекатель из арамидного композита и элероны из углеродного композита). Корпорация «МакДоннелл-Дуглас» применила элероны из углеродного композита и обшивку пилонов двигателей из боросодержащих композитов и алюминия на самолете MD-80. В свою очередь, компания «Боинг» стала изготавливать рули, обтекатели и зализы крыла на самолетах Боинг 747 из стеклопластика, а с конца 1970-х годов компания «Кавасаки» делала для самолета Боинг 747SP композитные закрылки. Кроме того, в рамках начатой NASA в 1975 г. программы повышения экономичности авиации компания «Боинг» смогла создать стеклопластиковый стабилизатор для самолета Боинг 737-200. Стабилизатор получился на 21,6% легче цельнометаллического; в 1984 г. он был сертифицирован FAA. После 18 лет эксплуатации (52 000 ч) один из стабилизаторов передали для исследования Национальному авиационно-исследовательскому институту в Уичито (NIAR), где удалось выявить только незначительное ухудшение его параметров.

Улучшенные углепластики компания «Боинг» также применяла в рулях высоты самолетов Боинг 727 последних серий, а с 1973 г. — в спойлерах самолетов Боинг 737. С конца 1970-х годов еще более широко композиты (углепластики, стеклопластики, арамидно-углеродные, стекло-

углеродные) использовались в конструкции самолетов Боинг 757/767: в обтекателях крыла, створках ниш шасси, гондолах двигателей, передних кромках крыла, спойлерах, элеронах, рулевых поверхностях, законцовках крыла. По схожему пути тогда шли концерн «Эрбас» и корпорация «МакДоннелл-Дуглас».

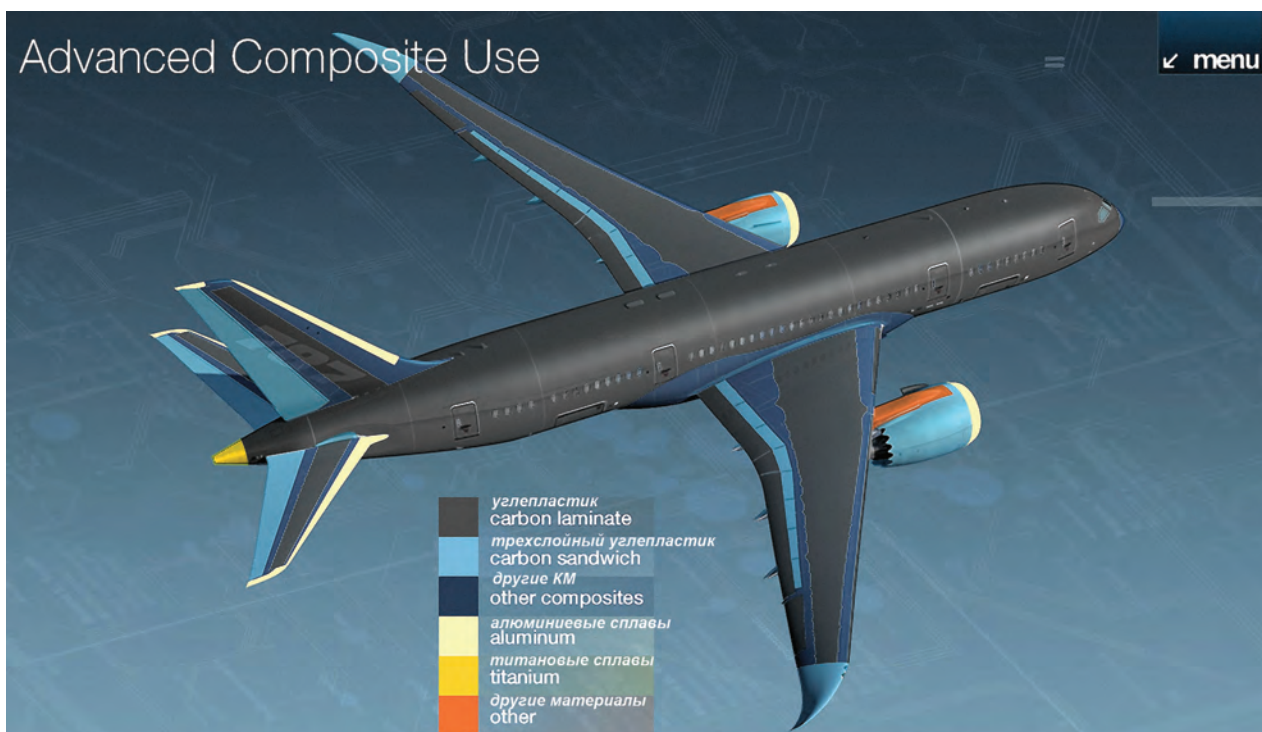
Главным шагом, сделанным компанией «Боинг» к применению крупных композитных конструкций, стал опыт совместных с японскими фирмами работ по проектированию ближнемагистрального самолета 7J7, предназначенного для замены ВС Боинг 727. На волне очередного топливного кризиса начала 1980-х годов компания «Боинг» решила использовать на самолете 7J7 все передовые достижения: турбовентиляторные двигатели, ЭДСУ и самые современные материалы. В этом отношении 7J7 стал предвестником будущих самолетов «Еллоустоун» и 7E7, в том числе и в части широкого привлечения к его созданию японских фирм (до 25% объема работ). Основным вкладом японцев стал созданный компанией «Фуджи» стабилизатор из композитных материалов, который прошел испытания в Японской самолетостроительной корпорации (JADC). Одновременно компании МНН и «Фуджи» приобрели большой опыт в работе с композитами при разработке истребителя FS-X (позже получил наименование F-2): кессон крыла изготовлялся и склеивался за одну технологическую операцию. Ту же технологию предполагалось использовать и при изготовлении крыла самолета Боинг 787.

Проект 7J7 компания «Боинг» вынуждена была закрыть в 1987 г. из-за проблем с шумом турбовентиляторных двигателей и общей технической сложности. Ставку пришлось сделать на дальнейшее развитие семейств Боинг 737 и 757.

В 1989 г. компания «Боинг» приняла участие в программе NASA по разработке перспективных композитных технологий (ACT), специально



Проект самолета Боинг 7J7



Материалы конструкции самолета Боинг 787

нацеленной на снижение стоимости транспортных перевозок путем широкого применения полимеров. Планировалось на 20% снизить расходы на производство и на 25% — стоимость эксплуатации. В частности, фирма «Боинг» отвечала за проектирование композитного фюзеляжа, а корпорация «МакДоннелл-Дуглас» — за проектирование крыла. После ее поглощения компанией «Боинг» досталась и эта часть работ.

Используя опыт проектных работ по самолету 7J7 и по программе АСТ, компания «Боинг» при разработке самолета Боинг 777 довела долю композитных конструкций до 12%. Например, практически полностью композитным стало оперение. Для изготовления главного лонжерона стабилизатора использовался углепластик T800/3900-2 фирмы «Торей», который позже нашел применение также и на самолете Боинг 787.

Следующим этапом стало проектирование самолета Y-2. На авиационной выставке в Париже в июне 2003 г. было заявлено, что из полимеров будут изготовлены целиком фюзеляж и основные узлы крыла, а общая доля композитов достигнет 50% массы пустого самолета. При этом экономия веса конструкции самолета должна была составить 5.5—6.5%. Первоначально компания «Боинг» планировала собирать фюзеляж по классической конструкции («черный

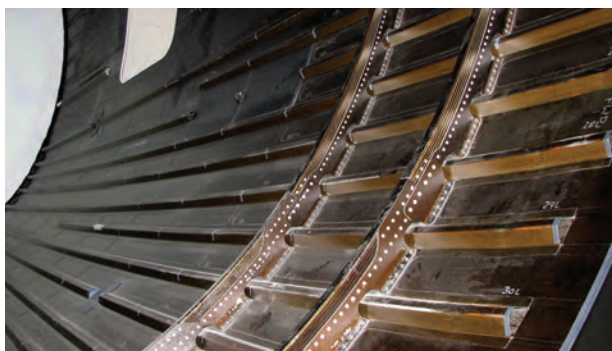
алюминий»), но потом решила максимально использовать все преимущества композитных материалов и изготавливать секции фюзеляжа одним узлом. Композиты позволили получить выигрыш веса за счет исключения дополнительных усиливающих элементов в местах сопряжения двух полуокружностей, образующих овальное сечение фюзеляжа, характерное для большинства пассажирских самолетов компании «Боинг». Композитный фюзеляж должен был в целом получиться на 12—15% легче, не подвергаться коррозии и усталостным повреждениям и требовать минимального обслуживания. Стрингеры выклеивались заодно с обшивкой, образуя единую конструкцию.

В мае 2004 г. основным поставщиком углепластика выбрали токийскую фирму «Торэй», производившую углеродное волокно 3900-й серии. Фирма «Торэй» построила в 1992 г. под Сиэтлом фабрику для производства композитного полуфабриката для обеспечения производства самолетов Боинг 777. Запуск программы 7E7 потребовал ее расширения, так как только на один самолет было необходимо более 35 т углеволокна. Объемы производства с 2004 по 2007 гг. выросли в 1.5 раза, но даже этого было недостаточно, и в 2007 г. фирма «Торэй» вложила почти 500 млн долл. в реконструкцию заводов (в Японии, США и Франции).

Помимо фирмы «Торэй» поставщиками материалов выбрали широко известных производителей полимеров: фирмы «Цайтик», «Гексел» и «Элкоа». Фирма «Цайтик» должна была поставлять углеволокно и термостойкий пластик для изготовления противообледенительного покрытия; фирма «Гексел» — крупнопанельные композитные детали с сотовым наполнителем (в частности, для предкрылков). Кроме того, специалисты фирмы «Гексел» впервые разработали пластиковые рамы для иллюминаторов самолета из материала, названного НехМС. В качестве субподрядчика фирма «Гексел» поставляет компании «Гудрич» сырье на базе материалов серии НехPly 8552/AS4 для изготовления мотогондол, а также специальный шумопоглощающий материал Acousti-Cap. Обе фирмы также поставляют многочисленные инструменты, стапельное оборудование и расходные материалы. Например, фирма «Цайтик» обеспечивала методом вакуумной формовки изготовление задней гермоперегородки фюзеляжа из пластика размером 4.3 × 4.6 м. Она стала первой подобной деталью в практике компании «Боинг». Особенностью процесса является отказ от автоклавов. Эта же технология использовалась фирмой «Хоукер Де Хэвилленд» в Австралии для изготовления углепластиковых элеронов, рулей, закрылков, а также спойлеров и зализов.

Специально для облегчения покраски и последующей перекраски самолетов фирма «Цайтик» разработала пленку, наносимую на готовые изделия. Пленка облегчает перекраску самолета, так как не требуется шлифовка для удаления старой краски.

Ставка на композитные материалы опиралась также на оптимистичные прогнозы компании «Боинг», связанные с быстрым прогрессом в технологии изготовления композитных конструкций. Так, если в 1980 г. технология ручного выкладывания композитных материалов давала производительность 0.2 кг/ч, то к началу серийного производства самолетов Боинг 787 ее планировалось поднять (на многоголовых автоматизированных машинах) до 400 кг/ч. Реально же оказалось, что к моменту начала испытаний опытных самолетов Боинг 787 производительность устройств по выкладыванию композитов составила 15 кг/ч, и даже применение многоголовых устройств выкладывания обещает достижение производительности 40 кг/ч, да и то в отдаленной перспективе. Для компании «Боинг» и ее субподрядчиков это означало рез-



Конструкция секции фюзеляжа

кий рост затрат на оборудование, вынуждая количеством компенсировать низкую производительность, что стало одной из причин отсрочки заявленной цели — достижения темпа серийного производства 10 самолетов в месяц.

Несмотря на широкое использование пластика, 20% общей массы планера приходилось на долю алюминиевых сплавов. Специалисты фирмы «Элкоа» предложили для самолета авиационный сплав 7085, который использовали при изготовлении лонжеронов и пилонов двигателей. Эта же фирма изготавливала титановые узлы для гидравлической системы самолета, что по ее оценке давало примерно 50%-ную экономию веса.

В целом титан составлял 15% массы конструкции самолета — рекорд для гражданских ВС. Для одного самолета А380 необходимо 70 т титана, а для производства самолета 787 — примерно 120 т титановых заготовок. Титан, обладая большей прочностью, лучше алюминия сочетается с пластиковыми деталями, так как имеет тот же коэффициент теплового расширения. Кроме того, он не корродирует при контакте с пластиком. Для самолета Боинг 787 был разработан специальный титановый сплав 5553. Чтобы исклю-



Титановые заготовки, поставляемые российской компанией ВСМПО-АВИСМА

чить перебои с поставками этого стратегического сырья, был заключен долгосрочный договор с российской компанией ВСМПО-АВИСМА.

В середине 2004 г. компания «Боинг» приступила к передаче конструкторской документации своим поставщикам для организации производства и испытания узлов и компонентов самолета. К концу 2004 г. была изготовлена опытная композитная секция фюзеляжа, на которой проверялась технология резки отверстий под иллюминаторы и люки, покраски, крепления силовых элементов. Проверялась также легкость отделения готовой секции от оправки.

Совместно с японскими производителями компания «Боинг» изготовила крупногабарит-



Кессон крыла

ную секцию половины крыла массой почти 25 т вместе с датчиками. Эта секция была необходима для оценки реальных нагрузок на будущее крыло — в первую очередь на совпадение с расчетными данными. Выполненная с использованием монолитных элеронов, она успешно выдержала 150% расчетной нагрузки.

Пока шли испытания, активно расширялись производственные площади. Японские производители построили под г. Хэнда корпус площадью 4500 м² для изготовления пластиковых деталей, а французы на площади 3000 м² подготовили новое оборудование для выкладки пластиковых деталей, их формовки и резки с помощью воды под давлением. Перемещение деталей по цеху осуществлялось роботизированными устройствами на воздушной подушке. Неразрушающий



Выгрузка кессона крыла из самолета Боинг 747 «Дримлифтер» в Эверетте

контроль изделий проводился с помощью ЭМРТ приборов. Главной проблемой оказалось обеспечение необходимого темпа изготовления и стабильного качества продукции.

Формирование крупнопанельных деталей позволило снизить их техническую сложность, сократить количество отверстий и разъемов, что обеспечивало повышение прочности, в том числе усталостной. Потенциально слабые узлы подвергли натурным испытаниям. Самую ответственную деталь — кессон крыла — изготовила компания «Фуджи». Композитный кессон в целом повторял по конструкции цельнометаллический, но технически был более сложен, так как толщина пластиковой детали менялась в зависимости от ожидаемой нагрузки. Например, обшивка крыла в районе ниши шасси была в три раза толще, чем в целом по крылу.

В июне 2006 г. была готова нижняя часть кессона размером 5.3 × 5.8 м, а через неделю — верхняя. До этого крупнейшей пластиковой деталью, которую делала компания «Фуджи», была створка ниши шасси длиной 3 м для самолета Боинг 777. Компания «Кавасаки» производила секцию фюзеляжа № 43, работая практически в цейтноте, потому что формальный контракт с компанией «Боинг» был подписан поздно. Также она делала секцию № 45 (ниши шасси) и заднюю кромку крыла, используя комплектующие, поставляемые из других стран. Компания МНІ изготовляла стрингеры длиной 22 м, которые затем склеивались с обшивкой крыла. Здесь же проводилась окончательная сборка крыла. Фирма «Шин Мэйва», известная своими летающими лодками, выпускала лонжероны крыла.

На площади 47 000 м² были подготовлены оборудование для выкладки композитных деталей консоли крыла и автоклав 8 × 40 м. Здесь же находилось оборудование для проверки кессона на герметичность. Готовые детали перевозились с завода в Хиросиме на барже в аэропорт Нагойя, откуда транспортировались в Эверетт по воздуху на специально переоборудованном грузовом самолете Боинг 747 «Дримлифтер». Крыло состояло из главного композитного лонжерона, обшивки и 18 композитных стрингеров. Кроме того, в конструкцию крыла входили 37 металлических нервюр.

Корпорация «Аления» изготавливала на своем заводе под Таранто секции фюзеляжа № 46 и 44, что составляло практически 60% его длины: 8.5 и 10 м соответственно. Оборудование



Транспортировка кессона крыла по территории завода

изначально было рассчитано на производство удлиненных вариантов этих секций для модификаций Боинг 777-9 и -10. К середине 2006 г. корпорация подготовила производственный корпус площадью 21 400 м², в котором разместились машина для выкладки композитных изделий 17 × 36 м и автоклав 8.5 × 19.5 м (по утверждению корпорации «Аления», крупнейший в Европе). ВПП ближайшего аэродрома



Изготовление секций фюзеляжа в корпорации «Аления»



Изготовление первой носовой секции фюзеляжа, Уичито, июнь 2005 г.



Испытания стабилизатора в корпорации «Аления»



Центроплан

пришлось удлинить для приема самолетов «Дримлифтер». При изготовлении стабилизатора использовали оборудование для самолета Боинг 777. Композитная секция стабилизатора длиной 11 м стала крупнейшей монолитной конструкцией, применяемой в коммерческой авиации. Производство стабилизаторов корпорация «Аления» запустила к декабрю 2006 г.

Носовую секцию № 41 производит бывший завод компании «Боинг» — «Спирит Аэросис-

темз» в Уичито. Вновь построенный корпус площадью 10 500 м² рекламировался как самое современное производство в мире. Носовая секция наматывалась из углеродной нити на машине «Ингерсол» вокруг вращающейся формы. Полимеризация осуществлялась в автоклаве размером 23 × 10 м. После извлечения из автоклава секция подвергалась неразрушающему контролю с помощью ультразвука, затем поступала на участок резки отверстий под иллюминаторы и двери. Далее она оборудовалась рамой для носового остекления, полом кабины и носовой стойкой шасси.

Получив самостоятельность в 2005 г., фирма «Спирит Аэросистемз» одновременно расширила свое участие в комплектации самолета Боинг 787. Так, помимо носовой стойки шасси в секцию № 41 стало монтироваться и оборудование кабины: системы управления, дисплеи, электропроводка и электроника — все, что раньше ставилось на заводе в Эверетте.

В большой спешке шли подготовительные работы и на заводе в Чарлстоне — совместном предприятии фирмы «Воут» и корпорации «Аления» — «Глобал Аэронаутика». Завод должен был обеспечивать сборку фюзеляжа из секций № 47 и 48 производства фирмы «Воут», № 43 — компании «Кавасаки», № 45/11 — компании «Фуджи», № 44 и 46 — корпорации «Аления», а также зализа крыла производства канадского подразделения компании «Боинг» в Виннипеге. Общая площадь сборочного производства составляла почти 10 000 м². Опробование сборочной линии с помощью макетных секций состоялось в конце 2006 г., производство было запущено в середине 2007 г.

Уже на стадии подготовки производства вице-президент фирмы «Глобал Аэронаутика» отметил сложность организации сборки из готовых секций, которые должны были поступать одновременно от нескольких производителей в разных частях света, и предположил, что отладка производственного процесса может затянуться. Это стало очевидным год спустя.

Рядом со сборочным заводом было подготовлено производство фирмы «Воут» для хвостовой секции фюзеляжа с одним из крупнейших в мире автоклавом 25 × 10 м. Производство включало машины: для выкладки композита, обрезочно-сверлильную и автоматическую клепальную. Контроль осуществлялся (как и на других производствах) ультразвуком на оборудовании фирмы NDI.

Пробный запуск производства всех субпоставщиков был осуществлен летом 2006 г., а в начале 2007 г. завод фирмы «Воут» собрал первые семь секций, продемонстрировав реальность самой широкой кооперации в истории авиакосмической индустрии. Осталось только убедиться, что все необходимые секции и узлы придут в Эверетт в срок.

Практически все знаковые в истории авиации пассажирские самолеты отличались использованием передовых авиационных систем и оборудования. Так, самолет Боинг 747 получил новую навигационную систему и отличался беспрецедентным на тот момент дублированием всего оборудования, самолет А320 стал первым гражданским ВС с ЭДСУ, а самолет Боинг 777 получил независимые дублированные авиационные системы.

На самолете Боинг 787 также был использован целый ряд новых решений в области авиационного оборудования, направленных в первую очередь на достижение высокой рентабельности эксплуатации. Первоначально на стадии проектирования самолета «Соник Круизер» планировалось широкое применение оборудования его предшественника — самолета Боинг 767. Однако по мере развития проекта становилось все более очевидным, что для повышения экономичности эксплуатации требуются революционные идеи.

В июне 2003 г. компания «Боинг» организовала специальную бригаду по технологии авиационных систем, в которую пригласила представителей более чем 20 производителей из разных стран. Фактически был объявлен конкурс на поставку различных авиационных систем, из которых компания «Боинг» предполагала выбрать наиболее перспективные.

В бригаду вошли такие известные фирмы, как «Зодиак», «Мессье — Бугатти» и «Талос» из Франции, «Диель» и «Либхер» из Германии, «Мацусита Авионикс Системз» и «Тейджин Сейки» из Японии, FR-HiTemp, «Смитс Аэропейс» и «BAE Системз» из Великобритании, а также американские «Коннекшн», «Крэйв Аэропейс», «Фэрчайлд Контролс», «Гудрич», «Дженерал Дайнэмикс», «Гамильтон», «Ханиуэлл», «Моог», «Паркер Хэннифин», «Рокуэлл Коллинз» и «Триумф Групп».

Создание электронных систем планировалось по принципу открытой архитектуры, так как руководство компании «Боинг» с самого начала заявляло о намерении производить самолеты 7Е7 до 2030—2040-х годов, а постоянный

прогресс в области электроники требует интеграции нового оборудования и внесения изменений. Открытая архитектура «борта» при этом обеспечивала гибкость и относительную простоту внесения доработок и изменений.

После выбора около 30 поставщиков они были объединены в группу «Триер 1». В рамках этого консорциума, взаимодействуя с одним из восьми подразделений компании «Боинг» по обеспечению производственного цикла (LCPT), каждый производитель должен был проектировать, производить и испытывать свою часть авиационных систем. Теперь компания «Боинг» выступала только в роли системного интегратора, оставив партнерам всю рутину по доводке систем и оборудования, в чем им помогала группа LCPT, оказывая консультации и решая наиболее сложные проблемы.

Самым главным отличием в архитектуре оборудования самолета Боинг 787 стал радикальный переход на электрическое обеспечение работы всех его систем и оборудования. Главной целью было достижение максимальной экономичности, что достигалось снижением отбора воздуха высокого давления от двигателя и заменой всего оборудования, ранее использующего воздушные приводы, на электрическое. Помимо того что пневматическое оборудование само по себе является источником проблем, отказ от него позволял на 35% снизить отбираемую от двигателей мощность и снизить массу за счет отказа от тяжелой системы воздухопроводов, клапанов и переходников.

Кроме экономии веса конструкции перевод на кондиционирование воздуха в салоне от электрического компрессора обеспечивал экономию энергии за счет отказа от предварительного охлаждения воздуха и исключения потерь при переключении клапанов в системе воздухораспределения. На электричество были переведены также системы охлаждения, уборки/выпуска шасси, приводы тормозов колес шасси и антиобледенительные системы. Основными источниками электропитания стали генераторы двигателей и ВСУ. Для привода гидравлики (как на предыдущем поколении гражданских ВС) использовались основные двигатели и электромоторы. Воздух от компрессора двигателя применялся только в системе обогрева мотогондолы и в противобледенительной системе передней кромки воздухозаборника двигателя.

Предпосылками к переходу на чисто электрические авиационные системы стали новые

электрогенераторы. По своему размеру два генератора мощностью по 250 кВт, стоящие на каждом двигателе самолета Боинг 787, занимают практически тот же объем, что один генератор мощностью 120 кВт на самолете Боинг 767. Не в последнюю очередь это было связано с переходом на более высокое напряжение бортовой сети.

Учитывая многообразие авиационных систем самолета, электрическая система генерировала ток разных параметров: переменный (235 и 115 В) и постоянный (28 и 270 В). До того в самолетах компании «Боинг» обычно использовались только переменный ток напряжением 115 В и постоянный ток 28 В. Общие генерирующие мощности самолета Боинг 787 минимум в два раза превысили показатели предшествующих ВС компании «Боинг», включая Боинг 747. Для этого применялись шесть генераторов: четыре по 250 кВт на двигателях и два по 225 кВт на ВСУ.

Электрическая система самолета была разбита на две независимые сети: носовую и хвостовую. Каждая из них включала дистанционно управляемую распределительную систему (RPDU), выполненную на основе твердотельной электроники без реле и термopереключателей. На эту электрическую систему в 2003 г. компания «Боинг» получила патент. В процессе работы система RPDU получала информацию с распределительных устройств, оценивала реальное потребление электричества различными агрегатами и индивидуально управляла электрической нагрузкой каждого элемента.

Практически все оборудование, которое ранее работало от пневматической системы (кондиционирование кабины, генерация азота для наддува баков, гидравлический насос и т. д.), было переведено на питание постоянным током напряжением 270 В и приводилось в действие с помощью мощных электромоторов. Для преобразования переменного тока напряжением 235 В в постоянный ток напряжением 270 В использовались четыре автоматических преобразователя.

Важность электросистемы подчеркивал тот факт, что конкурс на ее создание был объявлен первым среди всех авиационных систем самолета. Конкурс выиграла корпорация «Гамильтон», которая разрабатывала три (из четырех) основные электрические системы: генераторы, стартеры и систему дистанционного управления, а фирма «Зодиак» — основное распределительное

устройство. Фирма «Талос» создавала преобразователи напряжения.

Подразделение «Интертехник» фирмы «Зодиак» создавало устройства подключения электронной нагрузки ELCU, отвечающие за оптимизацию нагрузки на электросеть от различных устройств с помощью протокола по временным меткам (с точностью до микросекунд) TTP. Протокол TTP был разработан в 1990-х годах австрийской фирмой TTTech по европейскому стандарту специально для технических средств, в которых предусматривается переход от гидравлических и пневматических приводов на электрические с компьютерным управлением.

Еще один шаг к созданию полностью «электрического самолета» сделала компания «Боинг» в 2004 г., когда была выбрана электротермическая противообледенительная система британских фирм «Ультра Электроникс» и «GKN Аэроспейс». Традиционно до этого использовалась система нагрева передней кромки крыла горячим воздухом от двигателей. Такая электротермическая система существовала на лопастях винтов вертолета АгустаУэстленд AW101 «Мерлин» и конвертоплана Белл — Боинг V-22 «Оспри». В состав электротермической системы входят металлические нагревательные элементы, закрепленные в передней кромке крыла с помощью полимерных композитов. По расчетам такая система обогрева передних кромок получается энергетически более выгодной, она не приводит к потере энергии при сбросе нагретого воздуха после обдува передней кромки крыла через отверстия в районе элеронов или закрылков. Одновременно снижаются сопротивление воздуха в районе подвижных устройств и уровень шума. Общая экономия энергии может достигать при этом 50%.

Другая новинка в области гражданского самолетостроения — это электромеханические тормоза колес шасси с полностью цифровой системой управления (совместная работа фирм «Гудрич» и «Мессье — Бугатти»). Такие тормоза фирмы «Гудрич» уже были опробованы на БЛА Нортроп Грумман RQ-4B «Глоубал Хоук». Несмотря на возможные проблемы, учитывая принципиальную новизну системы, электромеханические приводы обеспечили экономию веса и повысили эффективность работы тормозов. Меньшая техническая сложность обеспечивала большую надежность по сравнению с гидравлическими приводами, а электронная система управления — полный контроль со стороны

пилотов за состоянием тормозов и процессом торможения. Модульный принцип построения новой системы сделал возможным ремонт без демонтажа всего узла.

Колеса шасси и тормоза для самолета Боинг 787 производила фирма «Гудрич», электромеханические приводы тормозов — фирма «Сидар Ноллс». Компания «Мессье — Бугатти» совместно с фирмой «Сажем» отвечала за изготовление силовой проводки, систем контроля и собственно тормозов (электромотора, понижающего редуктора, карбоновых тормозных дисков). Систему мониторинга и контроля тормозов изготовила фирма «GE Аэроспейс». Первая система мониторинга была изготовлена в 2004 г. Она основана на беспроводной передаче данных о скорости колеса, давлении, их связи с положением педали тормоза, РУД и других параметров, влияющих на торможение. Электронная система управления позволила повысить быстродействие тормозного механизма.

Конкурс на разработку носовой и основных стоек шасси впервые в истории компании «Боинг» выиграла фирма «Мессье — Бугатти». Стойки были сделаны с широким использованием титановых сплавов и композитов (подкосы шасси), что стало следствием просьбы фирмы «Боинг» снизить массу стоек. Титановые узлы шасси производились во Франции, Канаде и Великобритании, а также на заводе фирмы «Мессье — Бугатти» в Китае. Сборка изделия осуществлялась в Глостере, откуда узлы направлялись для испытания в Эверетт. Здесь стойки шасси дооснащались колесами, тормозами, приводами и поступали на сборочную линию. Шины с новым, более легким и прочным, кордом поставлялись фирмой «Бриджстоун».

Обновились также традиционные гидравлическая и топливная системы. Давление в гидравлической системе было повышено до 350 кг/см^2 по сравнению с традиционным 200 кг/см^2 . Фирма «Паркер» разработала три независимые системы: левую, центральную и правую. Центральная система приводилась от двух крупных электронасосов (вместо привычных воздушных турбин) и содержала до 110 л гидравлической жидкости. Наличие двух насосов обеспечивало повышение гибкости, так как второй насос подключался только при пиковых нагрузках в момент выпуска шасси или закрылков. Насосы правой и левой гидросистем имели привод от двигателей и дублировались электронасосами (при пиковых нагрузках и эксплуатации на земле



Основная стойка шасси



Носовая стойка шасси

с выключенными двигателями). Все три гидравлические системы необходимы для привода рулевых поверхностей, уборки/выпуска шасси, управления носовой стойкой шасси, реверсом тяги и выпуском закрылков. Первый образец гидравлической системы был опробован фирмой «Паркер» в 2006 г.

Топливная система самолета Боинга 787 вмещает в себя 127 000 л топлива при макси-

мальной взлетной массе 218 т. Система контроля топливной аппаратуры разработана фирмой «Гудрич», так же как и датчики (всего 136), объединенные в 6 узлов, преобразующих данные в цифровую форму и передающих их на дисплеи в кабине пилотов. Топливное оборудование поставила фирма FR-HiTemp — всего 47 различных узлов и 216 компонентов, включая электронасосы, работающие на повышенном напряжении по сравнению с обычными самолетами. Совместно с фирмами «Гамильтон» и «Карлетон» она также производит систему наддува баков азотом.

Бортовой вычислительный комплекс разработан компанией «GE Аэроспейс» и предназначен для управления практически всеми бортовыми системами. Комплекс характеризуется концентрацией вычислительных мощностей в единой вычислительной системе (CCS), что позволило уменьшить необходимый объем, вес и энергопотребление. Система CCS позволяет легко проводить модернизацию комплекса заменой отдельных компонентов и в целом соответствует концепции «открытого борта». Система, по утверждению разработчиков, является «масштабируемой и модульной», она легко наращивается, а модульный принцип построения позволяет обеспечить быструю замену узлов и их совместимость.

Использование единой системы CCS является логическим развитием концепции встроенной модульной архитектуры (ИМА) вычислительного комплекса, в которой все вычислительные функции все больше и больше «завязываются» друг на друга. Открытая архитектура вычислительного комплекса позволяет объединить в себе 80 задач, ранее решаемых отдельными компьютерами. Первоначально принцип единой системы с открытой архитектурой был использован по программе модернизации военно-транспортного самолета С-130 «Геркулес», а потом при создании самолетной информационной системы управления (AIMS) самолета Боинг 777. Но если на самолете Боинг 777 применялся вычислительный комплекс из 80 отдельных бортовых процессоров, управляющих несколькими сотнями отдельных устройств, то на самолете Боинг 787 количество процессоров сократилось до 30.

Система CCS состоит из трех основных элементов: основного вычислительного комплекса (CCR), объединяющего главный процессор и сопутствующую ему периферию, единой информационной сети (CDN) фирмы «Рокуэлл Коллинз», построенной по стандарту Ethernet 664/AFDX (авиационный, полноду-

плексный), и концентраторов сети (RDC). Физически сеть построена с использованием медной проводки и оптоволоконна, обеспечивающих скорость передачи данных в двух стандартах: 10 и 100 Мбит/с, что почти на три порядка выше, чем у бортовой информационной сети предыдущего поколения.

В состав бортового информационно-вычислительного комплекса самолета Боинг 787 входят две единые вычислительные системы CCS, восемь центральных процессоров, сетевые концентраторы и два сетевых концентратора для оптоволоконной сети в каждой системе CCS. К сети подключаются 21 датчик и столько же исполнительных устройств, передающих управляющие команды на приводы механизмов самолета.

В качестве операционной системы бортового вычислительного комплекса выступает открытая коммерческая операционная система (COTS). Она должна в будущем облегчить перепрограммирование отдельных функций системы при подключении дополнительного или обновленного оборудования, не требуя дополнительной сертификации всей вычислительной системы.

Для управления комплексом CCS применяется операционная система реального времени VxWork 653, обеспечивающая параллельное управление различными вычислительными процессами. Такой подход позволяет максимально загрузить центральный компьютер, а также сертифицировать отдельные программные модули независимо от БЦВМ и других программ.

Для самолета Боинг 787 компания выбрала ЭДСУ корпорации «Ханиуэлл», управляющую самолетом по всем трем осям (на самолете Боинг 777 ЭДСУ применялась только для управления по тангажу). Она позволила снизить вес авиационных систем и повысить топливную эффективность.

В ЭДСУ самолета Боинг 787 существует комбинация законов управления, названных Р-бета (Р — скорость крена) и С*и (принцип сохранения постоянной скорости за счет изменения угла тангажа, который применялся на самолете Боинг 777).

Проверка правильности построения алгоритмов ЭДСУ проходила в начале 2006 г. на доработанном самолете Боинг 777ER, на котором имелась возможность переключения со старой системы управления на новую и обратно. По мере испытаний постепенно увеличивали коэффициент Р-бета для оценки взаимного влия-

ния управления по крену и скольжению. Также на летающей лаборатории проходили испытания зависающие элероны и система изменяемой кривизны задней кромки крыла (TEVC), призванная снизить общее сопротивление на крейсерских скоростях.

Компания «Боинг» ожидала, что введение системы TEVC позволит снизить сопротивление самолета и его массу (на 300—450 кг). Система TEVC является полностью автоматизированной и позволяет на крейсерской скорости отклонять заднюю кромку крыла на 0.5° . Общий обеспечиваемый ход отклонения задней кромки составляет 3° : по 1.5° вверх и вниз.

Кроме того, почти 2 т массы конструкции крыла экономилось за счет более равномерного распределения нагрузки от органов управления. Управление по крену обеспечивалось совместным отклонением элеронов, спойлеров и флаперонов, что вместе с круткой крыла давало меньшие нагрузки на силовые элементы.

Для построения ЭДСУ (30 приводов рулевых поверхностей) корпорация «Ханиуэлл» использовала модульную систему Integrity-178B RTOS фирмы «Грин Хилл», которая включала в себя четыре независимых модуля управления полетом (FCS). Помимо функции управления она была рассчитана на парирование возмущающих моментов от турбулентности воздуха при воздействии их на самолет. По заявлению представителей компании «Боинг», это снизило амплитуду колебаний фюзеляжа самолета при попадании в «воздушные ямы» почти в три раза.

Приборная панель кабины получила четыре самых крупных на тот момент жидкокристаллических экранов 305×210 мм (почти в два раза больше, чем на самолете Боинг 777). Разрешение экранов позволяет выводить на них крупномасштабную карту, охватывающую расстояние до 2000 км, таким образом, чтобы экипаж мог ясно представлять расположение отдаленных точек маршрута. Их дополняли система отображения информации на фоне лобового стекла и два электронных планшета для отображения картографической, плановой и справочной информации.

В оборудование самолета входят локатор погоды, система предупреждения о сближении с землей (TAWS) и система предупреждения о сближении с самолетом в воздухе (TCAS). Раньше их установка была опционной — по желанию заказчика. Теперь она обязательна, что должно способствовать безопасности перелетов.



Стенд для испытания БРЭО

Сомнения вызывала установка системы отображения информации на фоне лобового стекла НРС/НСU-2200 фирмы «Рокуэлл Коллинз» из-за ее высокой стоимости. Однако в большой серии стоимость системы должна была значительно снизиться. Кроме того, авиакомпании высказались за установку этой системы.

ИЛС фактически является терминалом встроенной системы безопасности полета (ISS) той же компании «Рокуэлл Коллинз» и отображает данные о турбулентности воздушных потоков, погодных условиях, потенциально опасном сближении с самолетами или землей. Основная информация поступает с РЛС WXR-2100 «Мультискан». Она также включает систему TCAS, ретранслятор сигналов «Mode S» и систему TAWS производства корпорации «Ханиуэлл». Все оборудование дублировано. Передачу данных осуществляет система Integrity-178B.

Еще одной особенностью самолета Боинг 787 по сравнению с предшественниками является



Информация, отображаемая на ИЛС



Кабина экипажа

увеличенная площадь остекления кабины — до 3.12 м² по сравнению с 2.5 м² на самолетах Боинг 767 и 777.

На навигационную карту может накладываться карта погоды, не скрывая основные данные. Также на дисплеи выводится информация о воздушном трафике и справочная информация для экипажа. Диалоговая система отображения создана при активном участии авиакомпаний и в максимальной степени удовлетворяет требованиям достоверности. Так, например, раскладка клавиатуры дисплеев изменена со стандарта QWERTY (используемого на самолетах «Эрбас») на стандарт ABC.

Другое оборудование фирмы «Рокуэлл Коллинз» включает панель управления дисплеями, многофункциональные клавиатуры и систему управления курсором CCD (аналог манипулятора типа «мышь»). Она же поставляет видеоадаптер для дисплеев на базе процессора GE.

Резервную систему отображения информации с независимой системой питания и отображением основных параметров полета поставляет фирма «Талес».

Навигационная система разработана корпорацией «Ханиуэлл». Она включает: систему управления полетом, систему информирования о воздушной обстановке, приемник навигационной системы INR (с системой инструментальной посадки по 3-й категории или по 1-й категории GLB), дальномерную систему DME, автоматический радиокompас (опционно), два радиовысотомера и встроенную инерциальную навигационную систему. В качестве резервной используются указатель направления полета ИНС и компактные системы инерционной навигации, обычно применяемые на региональных самолетах.

Несмотря на многочисленные доработки, для облегчения переподготовки экипажей компания «Боинг» постаралась максимально сохранить общность систем управления с самолетом Боинг 777. На переподготовку давалось 5 дней. Пилотам самолетов Боинг 757 и 767 требуется восемь дней обучения, а пилотам самолетов Боинг 737 — 11 дней. Встроенная система инструментальной посадки позволяет рассчитывать посадочный маневр с помощью данных радиомаяков VOR, NDB и с помощью курсово-

го посадочного маяка, сопряженных со встроенной инерционной системой. Это облегчает подготовку пилотов на тренажерах, сводя различные процедуры захода на посадку к одной. Система отображения навигационной обстановки обеспечивает пилота координатами места с точностью до 180 м, а также данными о реальной высоте полета.

Радиооборудование, разработанное компанией «Рокуэлл Коллинз», включает программируемую радиостанцию, спутниковую систему связи SAT2100, систему передачи информации HIST2100 (поддерживает три голосовых канала и два канала передачи данных) и предусматривает возможность дальнейшей интеграции с перспективными коммуникационными, навигационными и управляющими системами. Радиосистема самолета получилась на 30% легче предшествующей, а потребление энергии снизилось на 20%.

Первый запуск двигателя для самолета Боинг 787 состоялся 14 февраля 2006 г. на испытательной площадке компании «Роллс-Ройс» под Дерби. Двигатель получил обозначение «Трент». Он стал первым турбореактивным двигателем, оборудованным электрическим стартером. 19 марта корпорация «Дженерал Электрик» впервые опробовала двигатель GE9x на испытательной базе в Огайо.

Оба двигателя являлись на тот момент самыми совершенными ТРДД с высокой степенью двухконтурности. Для обеих фирм создание таких двигателей — этапный момент в истории. Компания «Роллс-Ройс» впервые стала основным поставщиком для американского пассажирского самолета, победив американскую фирму. Двигателю GE9x сопутствовал большой коммерческий успех — он был выбран в качестве основного для самолетов Боинг 747-8 и Эрбас А350.

История обоих двигателей началась в 2000 г., когда руководство компании «Боинг» направило трем ведущим двигателестроительным фирмам предложение разработать для самолета «Соник Круизер» силовую установку на базе двигателей самолета Боинг 777, как наиболее подходящих к заданным требованиям.

Однако работы, проведенные в течение 2001 г., включая продувки в аэродинамических трубах, показали, что простой переделкой двигателя ограничиться нельзя. Требовалось создать новый двигатель, обладающий большой тягой, особенно на больших высотах, и, в свете ужесточающихся экологических требований, с меньшей эмиссией вредных газов и уровнем шума.

Первые проработки основывались на сочетании максимальной тяги 45 тс с высокими показателями экономичности двигателей самолета 777-200ER/300. Однако ТРДД получался слишком большого диаметра и с неприемлемо высоким сопротивлением для трансзвукового полета, а уровень шума — выше, чем требовалось.

К ноябрю 2001 г. были подготовлены требования к двигателю тягой 40 тс, обеспечивающему взлет самолета с максимальной массой с ВПП длиной 3200 м и обладающему высокими показателями экономичности на трансзвуковых скоростях. Это должно было стать главным отличием двигателей самолета «Соник Круизер». Правда, предварительные расчеты показали, что для самолета необходимы двигатели тягой не менее 45 тс.

В конце 2001 г. компания «Боинг» решила, что ей необходимы новые двигатели, что совпало с планами корпорации «Дженерал Электрик», которая уже приступила к работе над новым поколением ТРДД, названных GE9x. Первоначально фирма хотела сделать вариант двигателя CF6 с пониженной тягой для ряда проектов концерна «Эрбас» и компании «Боинг».

В 1999—2000 гг. основные проектные работы велись по варианту двигателя CF6-80 тягой 30—32 тс (CF6-80G2). Двигатель предлагался для проектов Боинг 747X и 767ERX. Их перспективы были неясными, и в 2000 г. корпорация «Дженерал Электрик» переключилась на требования концерна «Эрбас», который предполагал создать «укороченный» вариант самолета А330 на 250 мест (А330-100 или А306). Для такого самолета требовались двигатели тягой 25—27,5 тс. Именно в этом проекте впервые появились гибридные титановые лопасти вентилятора.

Требования концерна «Эрбас» были очень высокими, поэтому корпорация «Дженерал Электрик» постепенно подходила к пониманию необходимости разработки нового двигателя. Предстояло принять трудное решение: вернуться к ТРДД CF6 и профинансировать проект его доработки по типу CF6-80G2. В свое время корпорация очень удачно доработала свой двигатель GE90, установив новую «горячую» часть. В 1997 г. она решила не сбрасывать со счетов двигатель GE90, а предложить его доработанный вариант для самолета Боинг 777. ТРДД GE90 обладал хорошим потенциалом развития, так как в нем были воплощены технологические решения, полученные в результате длительных НИОКР, проведенных корпорацией «Дженерал

Электрик» совместно с NASA. Так, по следующим программам исследовались: UDF — двухконтурность 9 и композитные лопатки компрессора, QCSEE — легкое малозумное капотирование двигателя, ECSP — камера сгорания с пониженной эмиссией.

Но наибольший эффект был получен от совместной программы E3 («топливно-эффективный двигатель»), которая предусматривала создание 10-ступенчатого компрессора высокого давления принципиально новой аэродинамической схемы. Выполнение программы E3 обеспечило повышенную степень сжатия компрессора (до 23:1) в двигателе GE90. Вариант этого компрессора был использован в двигателях GE90-115B и GP7200. В ноябре 2001 г. уменьшенный вариант компрессора высокого давления ТРДД GE90-115B решили применить и в двигателе GE9x. По утверждению представителей корпорации, новый ТРДД с самого начала тесно привязывался к конкретному проекту самолета, способного при взлетной тяге двигателей по 40 тс на крейсерской скорости $M = 0.98$ перевозить 250 пассажиров. А для этого новый двигатель должен был иметь, по крайней мере, на 20% меньшее сечение, чем ТРДД GE90.

В рамках работ по ТРДД GE9x на двигателе GE90 были проведены испытания нескольких вариантов компрессоров высокого давления. Первые четыре предназначались для оценки аэродинамики, пятый — для испытания девятиступенчатой конфигурации, шестой — для доводки двигателя GE90-115B, а седьмой, испытанный в конце 2002 г., лег в основу уменьшенного на 28% варианта компрессора для ТРДД GP7200.

Главная проблема — разместить ТРДД в гондолах самолета «Соник Круизер». Так как двигатели размещались в крыле, диаметр компрессора низкого давления ограничивался 2.75 м, в результате чего степень двухконтурности получалась не более 8. Хотя корпорация «Дженерал Электрик» традиционно предпочитала пониженную степень двухконтурности для уменьшения шума, длинные гондолы должны были сыграть положительную роль в его снижении.

Ретроспективно можно отметить то, как изменения требований к силовой установке самолетов «Соник Круизер» и «Еллоустоун» предвещали возникновение будущих проблем. Во второй половине 2001 г. двигатели практически ежедневно сталкивались со все более неожиданными проблемами в выработке концепции

нового двигателя, которые заставляли принимать все более трудные и дорогостоящие решения. Сначала концепция предусматривала простую адаптацию существующего двигателя, но постепенно пришли к выводу, что нужен новый двигатель с высокой степенью двухконтурности. Столкнувшись с необходимостью серьезных изменений, моторостроители гораздо легче восприняли смену концепции самолета с «трансзвукового» на «эффективный». Тяга двигателя сразу была сокращена на 20%, а цикл работы стал менее напряженным. Однако вопросы повышения топливной эффективности все еще требовали разрешения. На рубеже 2002—2003 гг. проводились серьезные проектные исследования по концепции двигателя, чтобы, с одной стороны, удовлетворить жесткие требования компании «Боинг», а с другой — избежать дорогостоящих и рискованных конструкторских решений.

В феврале 2003 г. компания «Боинг» пригласила представителей трех двигателестроительных фирм для обсуждения силовой установки проекта 7E7. Основные требования к новому двигателю, помимо стандартных по тяге, экономичности, шуму, уровню загрязняющих газов и массе, включали жесткие сроки разработки — 5.5 лет. Ключевыми параметрами были: тяга 27.5—29 тс, лучшая экономичность на одно пассажирское место (на 17%), меньшие затраты на обслуживание по сравнению с самолетом Боинг 767-300ER (на 10%). Кроме того, требовалось снизить общую массу силовой установки, чтобы она получилась легче, чем у самолета A330-200. То есть от двигателистов требовали обеспечить 80% общего повышения экономичности будущего самолета 7E7.

Выбрать лучший проект компания «Боинг» собиралась к концу 2003 г. Победителя конкурса ожидал огромный заказ, а проигравшим не доставалось ничего. Компания «Боинг» прямо этого не заявляла, но опыт предыдущих работ, когда поставщиком двигателей для самолетов Боинг 737 и 777LR была одна фирма, намекал на возможный исход конкурса. Правда, компании «Роллс-Ройс» и «Пратт-Уитни» полагали, что такой большой заказ потребует привлечения, как минимум, двух поставщиков.

Меньше всего перспектив на победу было у компании «Пратт-Уитни», которая к рубежу 2000-х годов медленно вытеснялась с рынка мощных ТРДД для гражданской авиации. К этому времени, помимо вялых продаж двигателей PW4000 для самолетов Эрбас A330 и Боинг 777, компания

участвовала в программах по созданию двигателей для самолетов А380 (совместно с корпорацией «Дженерал Электрик») и А320 (Инджин Альянс V2500). Она сохраняла свои позиции на рынке узкофюзеляжных ВС и планировала их укрепить разработкой редукторного ТРДД. Однако для закрепления на рынке широкофюзеляжных ВС жизненно необходимой была победа в конкурсе по проекту 7Е7.

Проработав несколько вариантов переделки своего двигателя PW4000 еще для проекта «Соник Круизер», компания «Пратт-Уитни» пришла к заключению, что для самолета 7Е7 требуется принципиально новый двигатель. В результате появился проект двигателя PW-ЕХХ, базирующийся на модифицированном компрессоре низкого давления от ТРДД PW4000 и новом компрессоре высокого давления. Двигатель сохранял тот же диаметр (2,8 м), но имел степень двухконтурности 10 вместо 6. Новый десятиступенчатый компрессор высокого давления и двухступенчатая «горячая часть» были сделаны на основе работ по ТРДД F119 для истребителя F-22. Топливная эффективность по сравнению с эффективностью двигателя самолета Боинг 777 была повышена за счет степени сжатия — 50:1 вместо 43:1 на ТРДД PW4000.

Лопастни вентилятора по типу двигателя GP7200 должны были быть титановыми, полыми, а корпус вентилятора — дюралюминиевым с интегрированными стрингерами. Направляющий аппарат вентилятора также выполнял роль стоек капота вентилятора. Четыре ступени компрессора низкого давления крепились через специальный фланец, который отсоединял их в случае аварии. Отличительными особенностями были редуктор на турбине, камеры сгорания «Тэлон Х» с низким уровнем эмиссии загрязняющих газов, семиступенчатая турбина низкого давления и «сверхохлаждающиеся» лопатки турбины высокого давления.

Британская компания «Роллс-Ройс» предложила проект двигателя RB262 трехвальной схемы на базе двигателя RB211, который, в свою очередь, являлся увеличенным и улучшенным вариантом ТРДД «Трент» 900 для самолета Эрбас А380. При создании двигателя RB262 применялись наработки по программе «Вижин 10» (создание демонстрационной модели двигателя с пониженным уровнем шума и эмиссии вредных газов). Для достижения этих целей компания «Роллс-Ройс» пошла на беспрецедентное для себя увеличение степени двухконтурно-

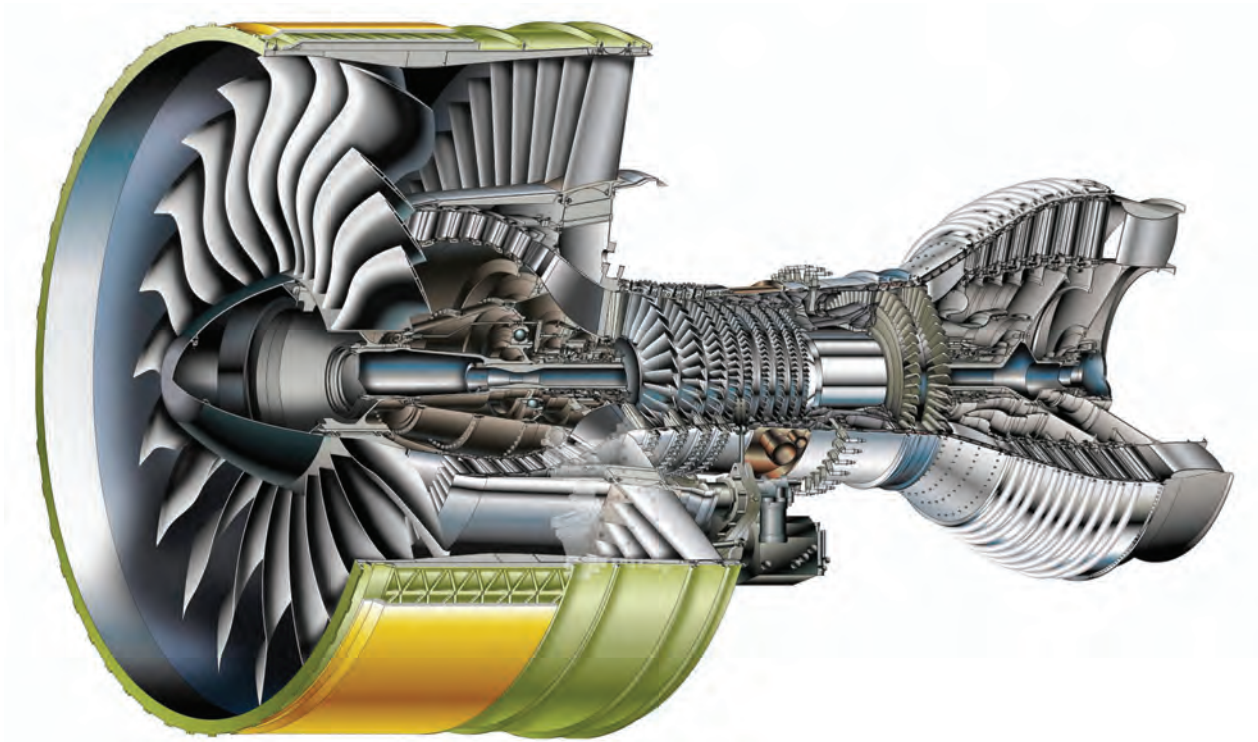
сти — до 10,5—11. Она максимально использовала стремление компании «Боинг» к исключению отбора воздуха от компрессора двигателя для самолетных нужд, что позволяло лучше согласовать работу компрессоров низкого и высокого давления, это давало возможность противоположного вращения ступеней промежуточного компрессора и вентилятора. Впервые это появилось на двигателе «Трент» 900, но там в противоположную сторону вращались ступени компрессора высокого давления, обеспечивая существенное улучшение характеристик двигателя и рост экономичности.

Но, пожалуй, самой необычной технической особенностью ТРДД «Трент» 1000 (как стал называться двигатель RB262) стал способ повышения степени двухконтурности без увеличения диаметра вентилятора. Это решение пришло во время проектных работ по двигателю для самолета «Соник Круизер», где требовалось разместить двигатель с высокой степенью двухконтурности в узких гондолах, находящихся в крыле.

После отказа от концепции «Соник Круизер» и, соответственно, от жестких требований к двигателю по диаметру и двухконтурности конструкторы компании «Роллс-Ройс» довольно легко привели свой проект в соответствие с требованиями проекта 7Е7, применив лопатки вентилятора с большой стреловидностью. Это позволило не только выполнить все требования по габаритам двигателя и его двухконтурности, но и использовать тот же двигатель в проекте модернизации самолета Боинг 747. Помимо нового вентилятора ТРДД «Трент» 1000 получил восьмиступенчатый промежуточный компрессор, шестиступенчатый компрессор высокого давления, новые камеры сгорания с пониженным уровнем эмиссии и шестиступенчатые турбины.

Трехвальная конфигурация двигателя «Трент» 1000 позволила по-новому подойти к проблеме увеличения мощности электрогенераторов: генераторы устанавливались не в коке вентилятора, а за промежуточным компрессором, что обеспечивало повышенный запас устойчивости его работы и снижало потери тяги при полете на малой высоте.

Тем временем эволюция проекта 7Е7 привела к появлению новых требований. В конце 2003 г., когда двигателестроительные фирмы уже готовили свои предложения для «3-й фазы» переговоров с компанией «Боинг», неожиданно оказалось, что для базовой модели 7Е7SR и ее удли-



Двигатель GE9x

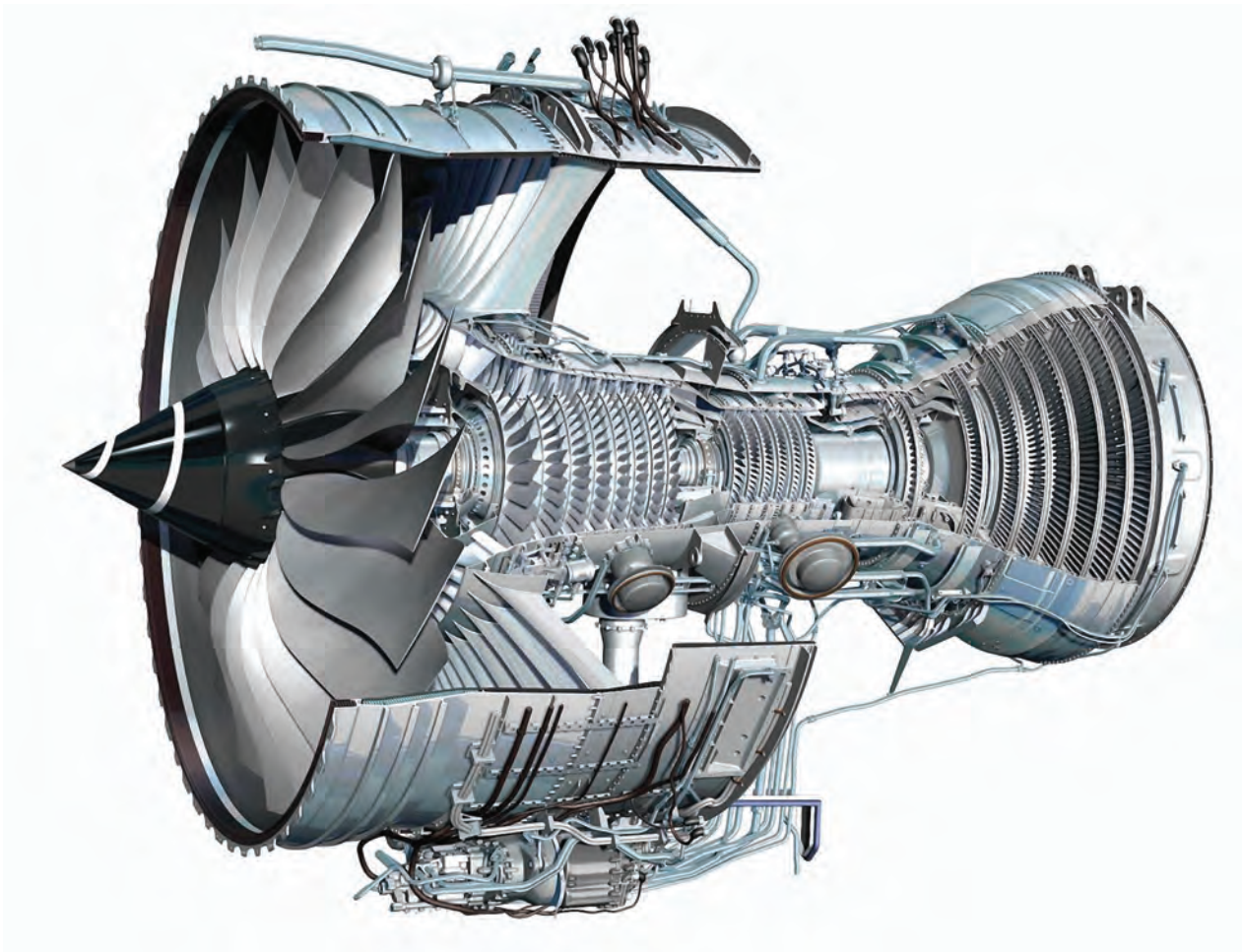
ненной модификации могут понадобиться два различных двигателя. Менять же конструкцию планера для экономии веса компания «Боинг» не хотела, так как планировала добиться максимальной общности в производстве самолетов 7E7SR и его удлиненного варианта. В результате было решено сэкономить на размахе крыла и на некотором ослаблении конструкции планера.

Как следствие, возникла шестимесячная задержка в выборе подходящих двигателей. Правда, пауза позволила компании «Боинг» рассмотреть альтернативные варианты компоновки двигателей, начиная от незначительных доработок до возможного изменения диаметра вентилятора или введения соосных вентиляторов противоположного вращения. Рассматривалась также возможность создания нового двигателя для «ближнемагистрального» варианта самолета либо отдельного двигателя для «удлиненного варианта» и отдельного для варианта SR и базовой модели.

В начале 2004 г. компания «Боинг» решила разрабатывать «полтора» двигателя: тягой 25—27.5 тс для варианта 7E7SR и базовой модели 7E7 и тягой 31.8 тс для «удлиненной» модификации 7E7STR. Под этой идеей она понимала две модификации с общим газогенератором и разными вентиляторами. Это требование поста-

вило моторостроителей в затруднительное положение, ведь максимальная унификация была одной из целей программы «эффективного» самолета 7E7. Правда, компания «Боинг» предупредила, что концепция силовой установки еще не сложилась и даже не принято еще решение: будут ли это два двигателя или один, от одного производителя или от двух. Действительно, уже в феврале 2004 г. после 6—8 недель колебаний компания «Боинг» отказалась от идеи «полтора» двигателя и вернулась к единому. По утверждению В. Жиллета, расчеты показали, что в ближнемагистральном варианте дополнительная тяга двигателя обеспечит более быстрый набор высоты. В результате требования к тяге двигателей всех трех проектов стали едиными.

Выбор победителей конкурса на разработку двигателей оказался довольно быстрой процедурой. Представители двигателестроителей прибыли на встречу с компанией «Боинг» в марте 2004 г. Сюрпризом стало решение выбрать двух победителей конкурса в расчете на полную взаимозаменяемость обоих двигателей. Этому, по мнению компании «Боинг», способствовали современные компьютерные технологии, позволяющие использовать единый программный комплекс для управления обоими типами двигателей.



Двигатель «Трент» 1000

«Открытая архитектура» стала отличительной чертой нового самолета в противоположность предыдущим самолетам, в которых силовая установка и БРЭО были жестко связаны друг с другом. До проекта 7Е7 связка «самолет — двигатель» была практически неразрывной в течение всего жизненного цикла, и даже если происходила ремоторизация, изменения в плане становились настолько серьезными, что отнимали много времени и средств.

Наконец, 6 апреля 2004 г. были объявлены победители: корпорация «Дженерал Электрик» и компания «Роллс-Ройс». Парадоксально, но проигравшей оказалась компания «Пратт-Уитни», единственная предложившая принципиально новый двигатель, очевидно обещавший серьезные технические преимущества. Правда, вскоре стало ясно, что выбор делался с точки зрения «политэкономии» без учета технических достоинств. В первую очередь требовалось пойти на определенные финансовые риски при разработке и запуске двигателей в производство.

Представители компании «Пратт-Уитни» признали, что не готовы пойти на серьезные финансовые затраты, чтобы не поставить под удар своего владельца — корпорацию «Юнайтед Технолоджис». И если для корпорации «Дженерал Электрик» победа в подобном конкурсе не была чем-то неординарным, то компания «Роллс-Ройс» вышла на рынок магистральных ВС в новом качестве.

В октябре 2004 г. было объявлено, что именно двигатель Роллс-Ройс «Трент» 1000 будет установлен на первые серийные самолеты Боинг 787, заказанные японской авиакомпанией ANA. В результате проект 7Е7 стал первым самолетом компании «Боинг», с самого начала оснащавшимся иностранными двигателями. До этого двигатели Роллс-Ройс «Трент» 800 использовались на «удлиненном» варианте самолета Боинг 777-300 и на Боинг 757, чья сборка прекратилась практически одновременно с подписанием первого заказа на самолеты Боинг 787. Выбор ТРДД «Трент» 1000 стал хорошим стартом для обшир-



Летающая лаборатория на базе самолета Боинг 747-200 для испытаний ТРДД «Трент» 1000

ной программы работ, предусматривающей создание трех модификаций двигателя: один тягой 32 тс для варианта 787-9 и два по 28.6 и 29 тс для вариантов 787-3 и 787-8, соответственно.

После того как двигатель компании «Роллс-Ройс» был выбран еще и новозеландской авиакомпанией, фирма официально объявила базовые параметры нового двигателя: степень двухконтурности 10, степень повышения давления в компрессоре 50. Конструкторские работы по двигателю завершились в феврале 2005 г., а первые испытания наметили на февраль 2006 г. Для отработки двигателя изготовили семь опытных экземпляров. Впервые за последние 30 лет компания «Роллс-Ройс» создала летающую лабораторию, купив самолет Боинг 747-200, который переоборудовали на заводе «Вако» в Техасе.

Пока компания «Роллс-Ройс» готовилась к летным испытаниям, корпорация «Дженерал Электрик» заключила контракт с концерном «Эрбас» в качестве стартового поставщика двигателей GEnx для будущего самолета A350. Это укрепило позиции ее в намерении заменить ТРДД CF6 на двигатель GEnx и стать основным поставщиком для самолета Боинг 787-8. Работы по ТРДД GEnx были форсированы, а в качестве субподрядчиков привлекли фирмы «Исикавадзима» и МНІ (Япония), «Аэро» (Италия), «Техспейс Аэро» (Бельгия) и «Вольво Аэро» (Швеция), взявшие на себя 36% общего объема работ.

С самого начала корпорация «Дженерал Электрик» выбрала пластиковое капотирование вентилятора, что обеспечило лучшую жесткость



Летающая лаборатория на базе самолета Боинг 747-100 для испытаний ТРДД GEnx



Капот двигателя GE9X

конструкции и экономию массы около 160 кг. В марте 2005 г. закончилась конструкторская работа, в октябре началась сборка первого образца, а в марте 2006 г. двигатель поступил на испытания. К летным испытаниям ТРДД GE9X приступили в третьем квартале 2006 г. на летающей лаборатории Боинг 747-100. В программе сертификации участвовало семь двигателей в трех модификациях: GE9X-54B (самолет 787-3), GE9X-64B (787-8) и GE9X-70B (787-9).

Руководство корпорации «Дженерал Электрик» особенно подчеркивало, что в разработке двигателя использовались только проверенные технологии; его создание было скорее «эволюционным, чем революционным шагом». По сравнению с ТРДД GE90 число лопаток вентилятора сократили с 22 до 18, что должно было снизить аэродинамические потери от интерференции воздушного потока, уменьшить шум и массу конструкции. Правда, несмотря на широкое применение композиционных материалов, вес двигателя корпорации «Дженерал Электрик» получился чуть больше, чем у ТРДД «Трент» 1000, но это компенсировалось меньшим расходом топлива и ббльшим ресурсом. Однако, судя по появившимся в то время утверждениям, топливная эффективность оказалась на 2—3% ниже заданной компанией «Боинг», но лучше, чему у ТРДД «Трент» 1000 (3—4%).

В окончательном варианте двигатель имел четырехступенчатый компрессор низкого давления, десятиступенчатый компрессор высокого давления, двухступенчатую турбину высокого давления и семиступенчатую турбину низкого давления (на одну ступень больше, чем у ТРДД GE90-94). Помимо композитов в двигателе применялись и другие инновационные материалы, например силикат ниобия (в турбине высокого

давления) и алюмоинад титана (на шестой и седьмой ступенях турбины низкого давления). Камера сгорания имела двойную кольцевую систему предварительного завихрения воздушного потока (TAPS), разработанную специально для европейского концерна «CFM Интернешнл» по совместной программе «Тех 56».

Компания «Роллс-Ройс» к середине 2005 г. приступила к созданию наземного стенда стоимостью около 50 млн долл. для отработки ТРДД «Трент» 1000. Еще 42 млн долл. она заплатила центру NASA им. Д. Стенниса за составление карты акустических полей двигателя.

Сборка первого двигателя началась в Дербии 7 ноября 2005 г., на 11 дней раньше, чем сборка ТРДД GE9X в США. В феврале 2006 г. состоялся первый запуск, целью испытаний в первую очередь была доводка компрессора низкого давления. Второй ТРДД предназначался для доводки промежуточного компрессора, третий — компрессора высокого давления. Четвертый двигатель был направлен в инженерный комплекс AEDC (Туллахома, шт. Теннесси) для высотных испытаний, а также испытаний в условиях обледенения, но с задержкой почти на год «из-за возникших ограничений».

Всего по программе разработки ТРДД «Трент» 1000 изготовили 16 двигателей (плюс два запасных). Семь использовали для наземных испытаний, причем большинство из них по несколько раз переделывалось. Остальные применялись для летных испытаний. Еще восемь двигателей собрали для первых четырех самолетов Боинг 787 (плюс два запасных). В программе также участвовали американские и иностранные фирмы, взявшие на себя до 35% работ: «Гудрич», «Гамильтон», «Кавасаки», МНІ и «Калтон». Сборка турбины низкого давления была передана испанской фирме ІТР.

Первый ТРДД GE9X опробовали к марту 2006 г. Его испытания, главным образом, имели цель убедить авиакомпания и сертифицирующие организации в надежности и безопасности конструкционных решений. Чтобы продемонстрировать надежность новых материалов (пластика и металлических сплавов) и TAPS в течение 2.5 лет было проведено 7000 ч экспериментов и 50 различных тестов на надежность. Для испытаний использовались отдельно «горячая часть», «нулевой» двигатель и семь полноценных силовых установок. «Нулевой» двигатель предназначался для отработки турбины и компрессора высокого давления, первый полноценный двигатель — для



Первая гонка двигателя «Трент» 1000 на первом опытном самолете Боинг 787

оценки характеристик, вибрационных испытаний и испытаний на больших углах атаки. Этот двигатель позже был разрушен во время испытания на отрыв лопаток турбины. Двигатель № 2 предназначался для отработки «шевронов» мотогондол, снижающих шум, оценки уровня загрязняющих газов, нагрузки на вентилятор и ресурсных испытаний. Двигатель № 3 также использовался для ресурсных испытаний и испытаний на столкновение с птицами, обледенение и работу при высокой влажности (дожде). Двигатель № 4 прошел испытания с повышенными нагрузками, в том числе с имитацией шестичасового режима полета. Двигатели № 5 и 6 применялись для летных испытаний, а двигатель № 7 — для оценки эмиссии и возможности работы при полном обледенении.

Для летных испытаний корпорация «Дженерал Электрик» планировала подготовить первый комплект двигателей в сентябре 2007 г., одновременно с получением сертификата FAA, часть 33. Летные испытания опытного самолета Боинг 787 предполагалось начать в октябре 2007 г., европейский сертификат на двигатель — получить в первом квартале 2008 г., а в середине 2008 г. и сертификат FAA, часть 35.

22 февраля 2007 г. приступили к испытаниям ТРДД GE9x на ЛЛ Боинг 747. По странному стечению обстоятельств первый запуск двигателя в воздухе с точностью до минуты совпал со смертью бывшего главы двигателестроительного подразделения корпорации «Дженерал Электрик» Брайана Рове — одного из первых разработчиков двигателей высокой двухконтурности и одного из «отцов» ТРДД GE90, на базе которого и был создан двигатель GE9x. Б. Рове мог бы



Первая гонка двигателя GE9x на самолете Боинг 787

гордиться полученными результатами: во время трехчасового полета ТРДД GE9x-1B64 «продемонстрировал нормальную работу совместно с бортовыми системами и приборами на высоте до 13 000 м и показал все свои характеристики, необходимые для дальнейших испытаний». Вначале оценивалась устойчивость работы двигателя, в том числе и на переходных режимах, проверялись запуск двигателя в воздухе, режимы работы камер сгорания, приемистость двигателя и характеристики обтекания капота. Вторая часть испытаний была связана с системой управления двигателем. Полеты проводились в основном в Викториавилле (Канада), испытания в условиях жаркого климата — в Юме (шт. Аризона), а высотные испытания — в Колорадо-Спрингс (шт. Колорадо).

Летающая лаборатория была доработана для снятия нагрузки с двух генераторов испытываемого двигателя: ТРДД GE9x давал 0.5 МВт электроэнергии по сравнению с 60 кВт на обычных двигателях. Доработки были закончены в январе 2007 г., монтаж двигателя под левым крылом занял всего один день.

Компания «Роллс-Ройс» к маю 2007 г. все еще продолжала испытания своего двигателя, но тем не менее могла доложить, что в испытаниях принимают участие уже девять двигателей, некоторые из них прошли по две и даже три переборки. К этому времени ТРДД «Трент» 1000 прошел испытания на 1000 циклов до первого обслуживания, а также на столкновение с птицами. Налет достиг 1000 ч, количество циклов — 2000. В апреле 2007 г. были проведены испытания на отрыв лопаток вентилятора — наиболее серьезное испытание по программе сертификации,

когда во время работы двигателя на полных оборотах происходит взрывное разрушение лопаток. Затем ТРДД испытывали на впрыск воды, попадание птиц, на больших высотах и общие 150-часовые испытания. Потом шесть двигателей перевезли в Вако (шт. Техас) для завершения испытаний на стенде. К моменту первого полета на ЛЛ Боинг 747 в феврале 2007 г. двигатель компании «Роллс-Ройс» прошел высотные испытания в комплексе AEDC, где имелось необходимое контрольное оборудование. Первое летное испытание ТРДД «Трент» 1000 состоялось в Вако в июне того же года. Таким образом, работа по обоим двигателям для самолета Боинг 787 завершилась в установленные сроки и, казалось, все было готово для первого полета опытного самолета, запланированного на август 2007 г.

Еще до начала полномасштабных конструкторских работ компания «Боинг» серьезно задумалась над проблемой испытаний и сертификации самолета. Большое количество композитных материалов и сложная электросеть самолета требовали беспрецедентного числа тестов и проверок, что выводило проблему сертификации на качественно новый уровень.

Работу с FAA по сертификации самолета Боинг 787-8 компания начала еще 28 марта 2003 г. Была достигнута договоренность зафиксировать технические требования к самолету и не менять их, за исключением некоторых образцов специального оборудования. Это позволяло заранее спланировать график необходимых работ по сертификации, особенно с учетом «специальных условий», которые могли неожиданно выдвинуть сертифицирующие органы США и ЕС. Порой эти «условия» выходили за рамки текущего технического регулирования. Компания «Боинг» не хотела оказаться в положении концерна «Эрбас», когда во время испытаний самолета А380 в 2005 г. неожиданно появились незапланированные требования к его сертификации.

Позже «замораживание» требований на уровне 2003 г. сказалось на надежности ряда систем самолета, например при выборе литий-ионных аккумуляторов, являющихся на тот момент новинкой. К началу эксплуатации самолетов Боинг 787 такой тип аккумулятора оказался потенциально опасным для напряженной эксплуатации, так как за прошедшие десять лет уровень технологии производства аккумуляторов и знаний особенностей их эксплуатации сильно изменился. Это привело к остановке эксплуатации самолетов Боинг 787 в январе 2013 г.

С 2003 г. представители компании «Боинг» постоянно работали с официальными лицами FAA и EASA, что позволило в 2006 г. согласовать график сертификации. Правда, компания «Боинг» не питала иллюзий, что «пакет» специальных требований может возникнуть в любой момент. К середине 2005 г. основные задержки просматривались лишь в испытаниях на удар молнии. К ним, возможно, могли привести и «некоторые другие проблемы, связанные с композитами и электрическим оборудованием».

Соответственно, разрабатывая новые узлы и конструкции, компания «Боинг» стремилась учесть все существующие стандарты безопасности и предусмотреть необходимые испытания. Так, композитные элементы следовало испытать на усталость, коррозионную стойкость и стойкость к повреждениям. Если для алюминиевой конструкции все это было уже отработано, то для композитной требовались новые подходы. Особенно это касалось стойкости к повреждениям от града, столкновения с птицами и ударов молний.

Исходя из опыта работы с композитными материалами на самолете Боинг 777, а также на военных самолетах В-2, F-22 и X-32, компания «Боинг» разработала «пирамидальную» систему испытаний различных элементов конструкции. Так, в основании «пирамиды» лежали испытания небольших образцов материала обычно шириной 5—7,5 см и длиной до 25 см. Потом испытания проходили более крупные образцы материалов — отдельные панели, используемые в крупных конструкциях. Еще выше на «пирамиде» проводились испытания крупноразмерных сборочных узлов и компонентов (полномасштабных панелей обшивки крыла), далее — испытания секций фюзеляжа и хвостового оперения. Наконец, на самую «вершину пирамиды» приходились статические и ресурсные испытания всей конструкции самолета в сборе.

Большой опыт эксплуатации композитных деталей самолета Боинг 777 позволил компании «Боинг» разработать технологии и приемы восстановления поврежденных пластиковых панелей и узлов. Для ремонта широко применялись заплатки из титана, крепящиеся на болтах, что давало возможность быстро возвращать самолет в строй. Подобную технологию предложили и для самолета Боинг 787.

Самой большой проблемой при использовании композитных материалов было то, что порой в них разрушалась внутренняя структура,

а внешне детали выглядели нормально. В частности, авиакомпании, особенно малознакомые с композитными конструкциями, на одной из конференций в 2005 г. не на шутку переполошились, когда компания «Боинг» заявила, что будет запрещать полеты самолетов с «царапинами на краске». Главной проблемой для европейцев оказалось то, что проверку целостности композитных конструкций планировалось проводить только на основе визуального осмотра без привлечения неразрушающих средств контроля. Однако компания «Боинг» отрицала, что это следствие недостаточного внимания к безопасности полетов, и настаивала на том, что сознательно выбрала только визуальный контроль, несмотря на известные проблемы с композитами. На практике это означало, что компания «Боинг» установила два критерия визуального осмотра целостности конструкции: обнаружение едва видимых повреждений (BVID) и видимых повреждений (VID). Категория BVID предусматривала обнаружение небольших, глубиной до 0.2—0.3 мм, повреждений, которые обычно невозможно увидеть при нормальном освещении с 1.5 м. Конструкция же была рассчитана так, что никакие повреждения категории BVID, обычно вызываемые падением посторонних предметов на крыло и фюзеляж, не должны были привести к развитию трещин и дальнейшему расслоению.

Для повреждений категории VID (посторонние предметы, летящие от колес шасси, и градины) регламентом установили пределы нагрузок, не приводящих к разрушению в течение периода времени, достаточного до выявления повреждения, его ремонта и устранения. Также в категорию VID включили повреждения, которые не приведут к разрушению конструкции в период между двумя инспекционными осмотрами. Первый такой осмотр запланировали после шести лет эксплуатации самолета.

В прочных композитных деталях допускалось появление трещин, не растущих и не приводящих к ослаблению конструкции. В целом, небольшие повреждения конструкции допускались в течение всего жизненного цикла самолета. По заявлению представителей компании «Боинг», все описанные типы повреждений были проверены в ходе ресурсных испытаний.

Безопасный полет также гарантировался при повреждениях, вызванных попаданием птицы весом 4 кг ($M = 0.85$, высота 2500 м), при ударе оторвавшейся лопасти вентилятора и даже при

декомпрессии кабины с образованием пробоины площадью до 1.8 м².

Еще одна серьезная проблема — это стойкость к ударам молнии, с которыми самолеты встречаются по несколько раз в год. Сложность состояла в том, что электрическое сопротивление композитного материала в несколько тысяч раз выше, чем алюминиевого. При отсутствии нормальной проводимости конструкции планера электрический потенциал, вызываемый ударом молнии, может привести к скачкам напряжения в электропроводке самолета с непредсказуемым результатом. До этого защита от молнии считалась на самолетах достаточной. Последней катастрофой от удара молнии стал взрыв ВС Боинг 707 авиакомпании «Пан Ам» в 1963 г.

Компания «Боинг» уделяла большое внимание этой проблеме. Так, согласно утечкам информации из компании, конструкторы опасались, что после удара молнии в топливных баках могут возникнуть искры. Поэтому использовали многоуровневую защиту. Первый уровень обеспечивала сетка из бронзового сплава на внешнем слое композитной обшивки, соединенная с металлическими элементами набора. Это позволяло распределить электрический заряд по фюзеляжу. Вся топливная система — баки, топливопроводы, элементы крепления — изолированы от удара током. В конструкцию баков входят материалы, предотвращающие возникновение какого-либо искрения, способного вызывать взрыв паров топлива. И наконец, для наддува баков применялся генератор азота (NGS), который начали устанавливать на самолетах с 1996 г., когда произошел взрыв баков на самолете Боинг 747-200 (как полагают, из-за короткого замыкания в районе центрального бака).

Похожая система защиты существует для оборудования самолета: специальная сеть проводников обеспечивает заземление всех устройств, имитируя металлический фюзеляж обычного самолета.

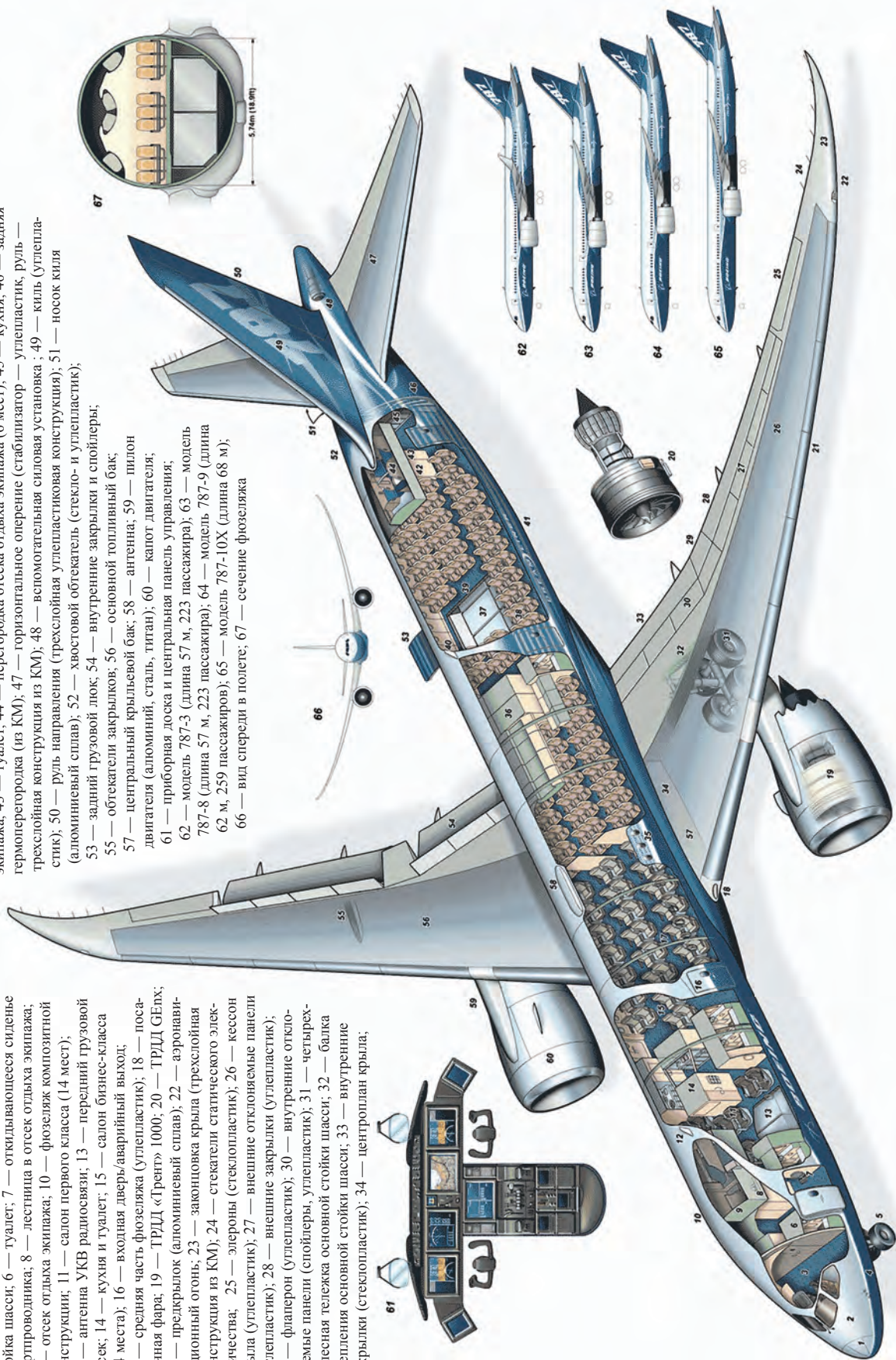
В марте 2007 г. появились «долгожданные» специальные условия FAA к самолету Боинг 787, а именно: способность ЭДСУ обеспечить управляемость по крену и при излишне резком переключении рулей; предупреждение пилотов о достижении предельных отклонений управляющих поверхностей, чтобы экипаж мог чувствовать выход на опасные режимы полета и ощущать возможность потери управления; пожаробезопасность топливной системы в случае ава-

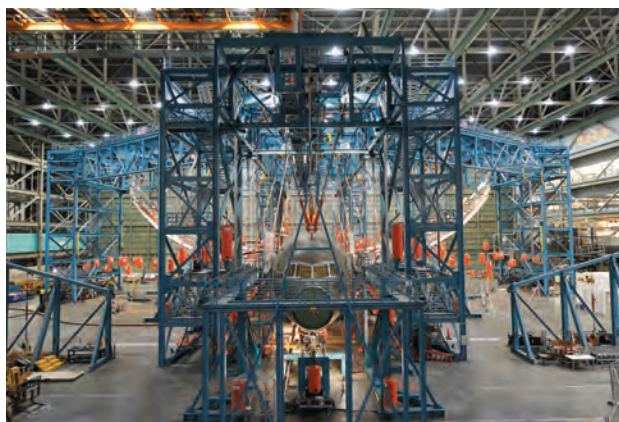
Компоновочная схема самолета Боинг 787-8:

1 — обтекатель РЛС; 2 — передняя гермоперегородка из КМ; 3 — кабина экипажа; 4 — отсек БРЭО; 5 — носовая стойка шасси; 6 — туалет; 7 — откидывающиеся сиденье бортопроводника; 8 — лестница в отсек отдыха экипажа; 9 — отсек отдыха экипажа; 10 — фюзеляж композитной конструкции; 11 — салон первого класса (14 мест); 12 — антенна УКВ радиосвязи; 13 — передний грузовой отсек; 14 — кухня и туалет; 15 — салон бизнес-класса (44 места); 16 — входная дверь/аварийный выход; 17 — средняя часть фюзеляжа (углепластик); 18 — посадочная фара; 19 — ТРДД «Трент» 1000; 20 — ТРДД БЭЛХ; 21 — предкрылок (алюминиевый сплав); 22 — аэронавигационный огонь; 23 — законцовка крыла (трехслойная конструкция из КМ); 24 — стекатели статического электричества; 25 — элероны (стеклопластик); 26 — кесон крыла (углепластик); 27 — внешние отклоняемые панели (углепластик); 28 — внешние закрылки (углепластик); 29 — фланерон (углепластик); 30 — внутреннее отклоняемые панели (спойлеры, углепластик); 31 — четырехколесная тележка основной стойки шасси; 32 — балка крепления основной стойки шасси; 33 — внутренние закрылки (стеклопластик); 34 — центроплан крыла;

35 — фотохромные иллюминаторы (483 x 279 мм) салона; 36 — туалет; 37 — задний грузовой отсек; 38 — салон экономкласса (176 мест); 39 — композитная конструкция пола пассажирского салона; 40 — УКВ антенна; 41 — хвостовая часть фюзеляжа (углепластик); 42 — лестница в отсек отдыха экипажа; 43 — туалет; 44 — перегородка отсека отдыха экипажа (6 мест); 45 — кухня; 46 — задняя гермоперегородка (из КМ); 47 — горизонтальное оперение (стабилизатор — углепластик, руль — трехслойная конструкция из КМ); 48 — вспомогательная силовая установка; 49 — киль (углепластик); 50 — руль направления (трехслойная углепластиковая конструкция); 51 — носок киля (алюминиевый сплав); 52 — хвостовой обтекатель (стекло- и углепластик); 53 — задний грузовой люк; 54 — внутренние закрылки и спойлеры; 55 — обтекатели закрылков; 56 — основной топливный бак; 57 — центральный крыльевой бак; 58 — антенна; 59 — пилон двигателя (алюминий, сталь, титан); 60 — капот двигателя;

61 — приборная доска и центральная панель управления; 62 — модель 787-3 (длина 57 м, 223 пассажира); 63 — модель 787-8 (длина 57 м, 223 пассажира); 64 — модель 787-9 (длина 62 м, 259 пассажиров); 65 — модель 787-10X (длина 68 м); 66 — вид спереди в полете; 67 — сечение фюзеляжа





Статические испытания

способности систем самолета в случае аварии в системе электропитания.

Испытания первой фюзеляжной секции самолета Боинг 787 начались в 2004 г. Они стали образцом для поставщиков компании «Боинг», которые в дальнейшем должны были не только проектировать, производить и собирать узлы и компоненты, но и самостоятельно испытывать их. Так, передняя кромка крыла испытывалась компанией «Спирит» (США), а задняя кромка — фирмой «Де Хэвилленд» (Австралия). Стабилизатор производился и испытывался концерном «Аления» (Италия), а шасси — в Торонто (Канада).

К середине 2005 г. полным ходом шли работы над фюзеляжем. Были готовы три опытные секции, включая два варианта хвостовой и носовой секций, и секция постоянного диаметра. Компания также приступила к сертификации узлов соединения секций.

Однако в мае 2006 г. на последнем, девятом, этапе сертификации фюзеляжа (оказавшемся внеплановым) произошла задержка — система неразрушающего контроля обнаружила воздушные каверны в одной из секций. Срочно заказали две дополнительные фюзеляжные секции. Анализ работ показал, что доработанная матрица фюзеляжной секции вызывает газообразование в композитной конструкции в момент ее помещения в автоклав.

рии самолета для обеспечения необходимого времени эвакуации пассажиров. Это было связано с тем, что алюминий является хорошим проводником тепла и при возникновении пожара вблизи конструкции самолета хорошо отводит тепло по всем элементам конструкции, защищая бак от перегрева на достаточное для эвакуации пассажиров время. Композитная конструкция гораздо хуже проводит тепло, а это может вызвать быстрый локальный нагрев конструкции бака в районе возгорания до температуры вспышки топлива. Поэтому FAA потребовало проведения дополнительных исследований композитной конструкции на противостояние огню в течение, по крайней мере, 5 мин.

Другие специальные требования касались стойкости конструкции бака к повреждениям обрывками взорвавшейся покрывки колеса шасси, усиленных перегородок в салоне, работо-



Планер для статических испытаний

Одновременно проводились испытания кессона крыла производства компании МНІ и центроплана — фирмы «Фуджи». Компания МНІ выпускала силовой набор крыла, а обшивку — компания «Боинг». В серии всю секцию, включая и обшивку, и силовые элементы, изготавливают уже в Японии.

Для испытаний на прочность компания «Боинг» планировала использовать два планера самолета: ZY997 для статических испытаний и ZY998 для ресурсных испытаний. Статические испытания показали, что элементы конструкции вполне способны выдержать нагрузки даже для «дополнительно увеличенного» варианта самолета — Боинг 787-10. Были продемонстрирова-

ны впечатляющие результаты — концы крыла, например, могли отклоняться вверх на 8 м. Нагрузка на крыло доводилась до 150% от расчетной. Статические испытания крыла продолжались до 2009 г.

Ресурсные испытания планера ZY998 начались в 2009 г. и продолжались три года для достижения расчетных 16 500 циклов полета. Сама конструкция самолета Боинг 787 была рассчитана на 44 000 циклов, а основная задача ресурсных испытаний — сертификация самолета на 88 000 циклов.

Сложность и энергоемкость авиационных систем самолета потребовали проведения обширных испытаний для выявления возмож-



Стенд для ресурсных испытаний

ных проблем. Была подготовлена сеть лабораторий неподалеку от аэродрома компании «Боинг». Одновременно организовали несколько лабораторий у производителей систем и оборудования.

Крупнейшей из них стала лаборатория корпорации «Гамильтон» по интеграции самолетной силовой электросети (APSIF) в Рокфорде, (шт. Иллинойс). Корпорация «Гамильтон» была крупнейшим поставщиком оборудования для нового самолета: 8 основных систем, 1300 компонентов и почти 1.5 млн строк ПО. Первоначально лаборатория APSIF задумывалась как стенд для отработки изделий корпорации «Гамильтон», но затем она превратилась в полномасштабную модель бортовой электросети самолета: от генераторов до управляющих электромоторов с проводкой, полностью имитирующей электросеть самолета.

Лаборатория располагалась на двух этажах: на нижнем установили генераторы, преобразователи электричества и потребители, на верхнем — авиационные приборы и контрольное оборудование. ВСУ находилась в специальном контейнере за пределами лаборатории. Для имитации работы двигателей имелись электрогенераторы мощностью 1500 л. с. Диаграмма их работы совпадала с реальными данными работы генераторов на двигателях.

Основные потребители — реальные электромоторы и приводы, включая четыре стартер-генератора (250 кВт) и два генератора ВСУ (225 кВт). Вместе они обеспечивали генерацию 1.45 МВт электроэнергии, передаваемой по четырем шинам. Два сдублированных распределяющих устройства управляли подачей электроэнергии на преобразователи переменного тока напряжением 235 В в напряжение 115 В переменного тока, 270 и 28 В постоянного тока.

Среди потребителей были четыре компрессора мощностью 75 кВт для наддува и кондиционирования кабины, два вентилятора для обдува оборудования самолета на стоянке и четыре гидравлических насоса мощностью 75 кВт.

Лаборатория корпорации «Гамильтон» позволяла компании «Боинг» «удаленно» контролировать проводимые эксперименты. Аналогичные лаборатории и стенды, только меньшего масштаба, были оборудованы на фирмах «Ханиуэлл», «Рокуэлл Коллинз» и «GE Аэроспейс» и др. Компания «Боинг» рассчитывала, что, несмотря на техническую сложность и новизну систем, сеть лабораторий позволит отработать все оборудование еще до первого полета.

В октябре 2006 г. началась сборка интегрированного испытательного комплекса, состоящего из нескольких взаимосвязанных стендов: авиационного оборудования (AIL), интегрированного испытательного стенда (ITV), распределительной электрической системы (АЕМ), инженерных стендов, стендов для испытаний шасси, интегрированного стенда силовой установки (PIL), стендов по отработке освещения, гидравлики. Основное внимание уделялось интегрированному стенду ITV («железной птице») — установке на едином каркасе всех управляющих и гидравлических систем вместе с необходимым программным обеспечением. Подобный стенд использовался для отладки оборудования самолета Боинг 777, но новый стенд позволял проводить три различных эксперимента одновременно. Стенд ITV также имел тренажер кабины экипажа, имитировавший работу систем в процессе полета и работавший одновременно со стендом авиационного оборудования AIL.

К апрелю 2007 г. все стенды поставили под нагрузку и приступили к комплексной отладке БРЭО, гидравлики и систем управления. Это был важный шаг перед началом сборки систем реального самолета. Правда, после выполнения 25% всех испытаний возник ряд проблем, но руководство компании «Боинг» было настроено оптимистично: «...Нашей задачей было выявление различных недостатков на максимально ранней стадии работ. Нам удалось выявить и устранить около 2000 различных недостатков. Причем на наше счастье большинство проблем возникало на стадии интеграции и не было связано с недостатками самих систем, в результате чего нашим поставщикам не пришлось выполнять дополнительных доработок».

Однако дальнейшие испытания и сборка первых опытных самолетов опровергли это заявление. Сложная многоступенчатая система поставщиков, многие из которых привлекли для своих работ персонал, не имеющий опыта работы в авиакосмической отрасли, приводила к большому числу проблем. Например, не проводилось документирование всех выполненных работ и, как следствие, терялся контроль качества. Масса отдельных комплектующих оказывалась завышенной и их требовалось переделывать. Узлы разных поставщиков не подходили друг к другу, в результате при попытке сборки и разборки они часто повреждались и направлялись обратно производителю для переделки. При этом изначально проблема состояла в том, что выработка специфика-

каций на различные этапы работ всегда запаздывала по мере прохождения вниз по цепочке контрагентов до непосредственного исполнителя и, как следствие, приводила к срыву сроков выполнения работ.

К концу мая 2007 г. стенд авиационного оборудования AIL заработал нормально, хотя отдельные ошибки из-за неправильной интеграции всех систем продолжали тормозить процесс отладки. Основной объем работ по авиационным системам был выполнен, включая готовность программного обеспечения, содержащего до 6.5 млн строк кода — в три раза больше, чем у самолета Боинг 777.

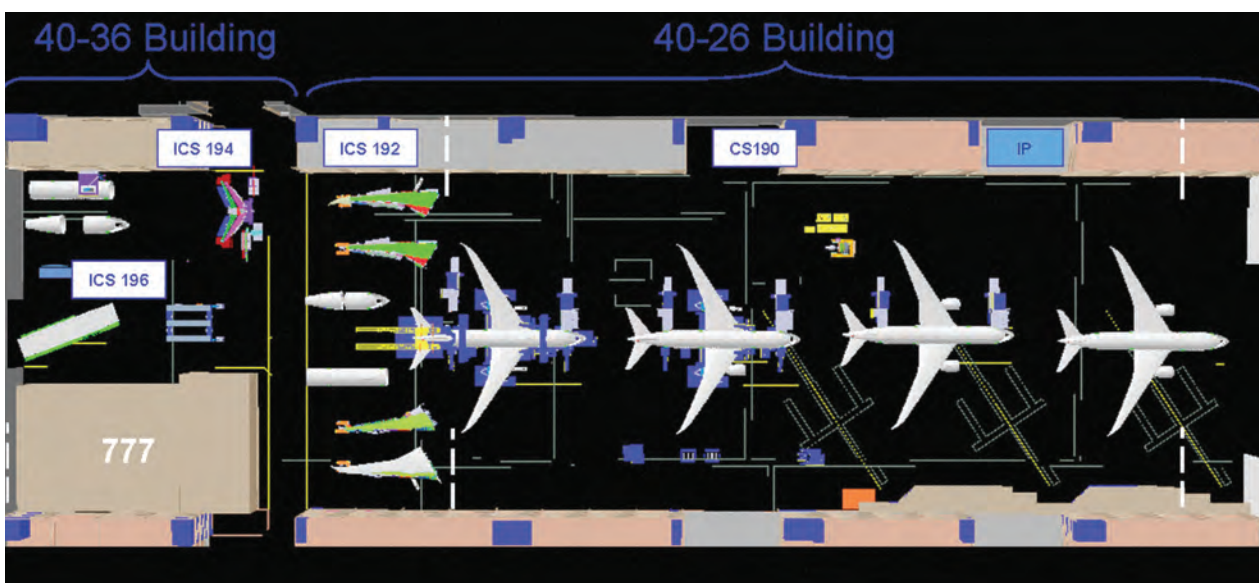
К середине 2005 г. конструкторские работы по самолету завершились, хотя выпуск электронных чертежей для различных компонентов самолета все еще продолжался. Так, чертежи пилонов и гондол были уже готовы, чтобы начать испытания силовой установки с ТРДД «Трент» 1000 к февралю 2006 г. В то же время изготовление зализа крыла отложили — его собирались изготовить после пробной сборки фюзеляжа.

Для доводки внешнего облика самолета аэродинамические расчеты на суперкомпьютерах «Крей» заняли 800 000 ч. Однако основные работы все равно выполнялись в аэродинамической трубе. Общий объем продувок достиг 15 000 ч, в том числе 5000 ч потратили на продувки окончательного варианта компоновки самолета. К этому моменту вариант 787-8 стал базовым, под него отлаживалась система управления полетом и БРЭО. Продувки этого варианта завершились к началу 2006 г.

Одобрение окончательного технического облика самолета в сентябре 2006 г. дало старт изготовлению его узлов и компонентов на заводах по всему миру. С целью рекламирования нового самолета компания «Боинг» даже организовала журналистам тур по трем континентам. Но если заводы в Америке и Европе были хотя и готовы, но еще стояли без работы, то фирма «Фуджи» в Японии уже продемонстрировала первый готовый узел крыла — обшивку центроплана, которую успели изготовить за три дня до визита журналистов.

В декабре 2006 г. компания «Боинг» провела «виртуальный» запуск сборочной линии в Эверетте, подготовленной с помощью фирмы «Дассо Системс» и других поставщиков сборочного оборудования. Использование цифровых технологий, по утверждению компании «Боинг», ускорило работы почти на год по сравнению с предыдущими самолетами. Презентация включала компьютерное моделирование сборки самолета и его движение по цеху. Первоначально на линии должно было работать 500 чел., а потом до 800 чел. на планируемом пике производства — один самолет в три дня. С этого самолета предполагали выйти на шестидневный цикл выпуска.

В соответствии с новомодной концепцией «экономного производства» число рабочих оказывалось на порядок меньше, чем при сборке других самолетов «Боинг». Это должно было стать результатом смены производственной стратегии, перехода с производства самолета по всему циклу на «интеграцию» из готовых узлов и компонентов. Компания «Боинг» еще не могла



Первая виртуальная сборка, декабрь 2006 г.



Финальная сборка первого самолета

предположить, что процесс «интеграции» изделий различных производителей займет гораздо больше времени и сил.

С самого начала выяснился недостаточный уровень подготовки персонала сборочного цеха. Компания «Боинг» была вынуждена забирать наиболее опытных рабочих с других производственных линий и пополнять их вновь подготовленными сотрудниками. Развернув программу «Экономия плюс», фирма повысила квалификацию рабочих до техников, обучая каждого сразу нескольким сборочным операциям, а также азам контроля качества продукции. Особое внимание уделялось бережному отношению к комплектующим самолета, доставляемых из-за океана.

Осенью 2006 г. в Эверетте был организован специальный центр по подготовке рабочих. Курс переподготовки (87 ч) рабочие должны были закончить в свое свободное время. В январе 2007 г. персонал приступил к квалификационным испытаниям, которые заняли 10 недель и охватывали 44 различных вида профессиональной деятельности. Для подготовки использовалась реальная секция фюзеляжа. Всего до конца 2007 г. переподготовку прошли 1100 рабочих.

Первую секцию фюзеляжа (11/45) изготовили в Японии согласно плану, в декабре 2006 г. и отправили 15 января 2007 г. грузовым самолетом «Дримлифтер» в центр по сборке фюзеляжа в Чарлстоне вместе с секцией № 43 производства компании «Кавасаки». Первым крупным агрегатом, прибывшим в Эверетт, стало горизонтальное оперение производства корпорации «Аления». Первый киль изготовили в Фредериксоне 7 мая. В середине мая прибыла секция крыла (длина 30 м) от компании МНН, выполнившей свои 35% объема работ по планеру.

В конце марта в Чарлстон прибыли фюзеляжные секции № 44 и 46 от корпорации «Аления». 11 мая поступили первая носовая секция № 41 и хвостовая часть фюзеляжа от фирм «Спирит» и «Воут». С поступлением крыла и центроплана можно было приступить к сборке первого самолета ZA001.

Сборка официально началась 21 мая 2007 г. Компания «Боинг» с оптимизмом смотрела в будущее: первый самолет хотели выкатить 8 июля 2007 г. (по американскому стандарту — 7-8-07 дата была выбрана специально). К опробованию систем следовало приступить в июле, а 28 августа 2007 г. — совершить первый полет.



Сборка первого опытного самолета, июнь 2007 г.

В мае 2007 г. состоялась презентация «экономной» сборочной линии самолетов Боинг 787 в корпусе 40-26 завода в Эверетте. Внешне во время работы новая сборочная линия должна была разительно отличаться от других производств компании «Боинг» и казаться безлюдной, хотя была рассчитана на сборку одного самолета каждые три дня — рекорд для подобного производства.

Сборочные узлы и конструкции прибывали в Эверетт по железной дороге, морским транспортом и на транспортном самолете «Дримлифтер». Наиболее крупные узлы перемещались по цеху с помощью специального погрузчика, названного «портальным краном».

Внешне работа цеха напоминала склейку пластиковой модели самолета из крупных деталей. Здесь же происходила сборка оперения самолета, консолей крыла, монтаж пола салона. Готовые конструкции перевозились к месту установки «портальным краном».

Корпус 40-26 имел четыре сборочные позиции: три основные и одна резервная. Первоначальный темп предусматривал сборку одного самолета за семь недель, но уже с этого самолета время сборки планировали сократить до шести дней. Общий темп выпуска к 2010 г. должен был достичь 10 самолетов в месяц.

Сборка начиналась на первой позиции, характер работы на которой отражался прозвищем «Большой взрыв». Центральная секция фюзеляжа соединялась здесь с крылом, потом присоединялись остальные фюзеляжные секции. Главной стапельной конструкцией для сборки самолета была большая двойная башня обслуживания МОАТТ, которая как бы запирала собираемый самолет между двумя стапелями. Она используется для соединения фюзеляжных секций и установки хвостового оперения. Перед ней устанавливаются два округлых стапеля — «постели» для переднего и заднего соединительных узлов крыла. С помощью переднего стапеля к центральной секции фюзеляжа крепится носовая секция № 41, а с помощью заднего стапеля — секции № 47 и 48 и хвостовая часть фюзеляжа.

Благодаря многочисленным увязкам и согласованиям работы поставщиков, занявшим три года, сборка секции осуществляется практически без подгонки, число отверстий, которые сверлятся вручную, сведено к минимуму. Позиционирование секций перед сборкой выполняется с помощью рельсовых направляющих. Соединение деталей происходит под постоянным контролем лазерных уровней и дальномеров, использующих информацию цифровой базы данных.



Выкатка первого опытного самолета

Затем самолет по рельсовым направляющим перемещается на вторую позицию. Здесь к крылу крепятся передняя и задняя кромки с механизацией, двигатели, зализ крыла и стойки шасси. После установки шасси к третьей позиции самолет передвигается уже самостоятельно. Здесь устанавливается внутреннее оборудование и происходит окончательная проверка систем.

Для обеспечения бесперебойной поставки на сборку необходимых узлов и деталей была организована специальная компания «Нью Дип», которая непосредственно взаимодействует с поставщиками, обеспечивая инвентаризацию, заказ, поставку, хранение, предварительную сборку и другие операции с комплектующими. Крупные комплектующие (двигатели и мотогондолы) поступают непосредственно от производителей.

На стадии сборки первого опытного самолета ZA001 компания «Боинг» определилась с числом необходимых опытных экземпляров: ZA002 — планер для статических испытаний; ZA003 — второй летный образец с двигателями компании «Роллс-Ройс»; ZA004 — планер для ресурсных испытаний; ZA005 и ZA006 — предсерийные самолеты для поставки заказчикам и испытаний с двигателем корпорации «Дженерал Электрик». Седьмой самолет (ZA007), первый в серийной комплектации, планировалось поставить авиакомпании ANA в мае 2008 г.

8 июля 2007 г. первый опытный самолет Боинг 787 был официально представлен прессе. На церемонию выкатки самолета из цеха пришло 15 000 человек, а телемост смотрели около миллиона человек по всему миру, в той или иной степени занятых в производстве.

Впрочем, специалисты, присутствующие на выкатке, сразу отметили многочисленные незаделанные отверстия и лючки, отсутствие оборудования в кабине и салоне. В глаза бросалась нехватка ряда болтов, скрепляющих секции фюзеляжа. Кто-то из прессы сказал: «Потемкин-Дримлайнер»...

По плану до первого полета оставалось семь недель, а требовалось провести огромный объем доводочных работ. Компания «Боинг» стала постепенно переносить дату первого полета: сначала на сентябрь 2007 г., потом и дальше. В конце июля президент компании Джеймс Мак-Нерней подтвердил, что работы отстают от графика, а затраты растут, достигнув 3.7 млрд долл.

Первые намеки на проблемы появились еще в 2006 г., когда компания «Боинг» заявила об отказе от планов увеличения темпов производства до 12 самолетов в месяц к 2011 г. Одновременно руководство компании отметило, что было вынуждено «снизить давление» на поставщиков в плане сроков и объемов поставок, чтобы «гарантировать качество работ».

Весь букет проблем, возникавших в спешке организации распределенного производства, стал очевиден во время опытной сборки первой секции фюзеляжа в начале 2006 г. — «неблагодарной бочке, в которой ничего не работает» (как выразился один из конструкторов). Поэтому пришлось изготавливать новую изложницу, с ее помощью подготовили еще две опытные секции. Как оказалось, форма слишком сильно расширялась при нагреве в автоклаве, а из-за плохого отвода излишнего воздуха в композитной секции образовывались пузыри и пустоты. Первую изложницу в результате пришлось сдать на слом.

Следующей проблемой, выявившейся в 2006 г., стало превышение массы пустого самолета на 2—3%. Поэтому значительные инженерные ресурсы бросили на борьбу за снижение веса, причем не только в компании «Боинг», но и на фирмах-субподрядчиках. На этом фоне хорошей новостью было только то, что центроплан крыла, сделанный фирмой «Фуджи», оказался легче расчетного.

Серьезной проблемой, как ни странно, оказался успех менеджеров по продажам, которые к середине сентября 2006 г. оформили заказы на 420 самолетов — рекордное число до первого полета самолета. Любая задержка с поставками грозила теперь перерасти в снежный ком неустоек и заставляла руководство компании «Боинг» все более нервно отслеживать сроки поставок комплектующих.

Узкими местами стали обеспечение полуфабрикатами, например крупноразмерными поковками из титана, и сопряжение различных систем и их программного обеспечения в единый, отлаженный комплекс. К моменту сборки первого опытного самолета выявились четыре основные проблемы: изготовление крупногабаритных композитных деталей, организация цепочки поставщиков и управление ею, лабораторная отладка авиационных систем самолета и достижение заявленных параметров двигателей по тяге и экономичности.

В конце октября 2006 г. обозначилась еще одна проблема: компания «Боинг» заявила об увеличении затрат на НИОКР на 450 млн долл., что на 60% превышало первоначальные планы. Хотя одновременно стартовала программа создания самолета Боинг 747-8, главной причиной стало возрастание затрат на разработку самолета Боинг 787.

Постоянная борьба за снижение веса захватывала все новые аспекты конструкторских



Испытания шасси первого опытного самолета

работ и опытного производства, распыляя средства и силы, отчего у ряда ветеранов компании «Боинг» возникли ассоциации с производственным кризисом конца 1990-х годов. Общее превышение массы конструкции самолета достигло уже 2.5 т, а всего с момента начала выпуска конструкторской документации до начала производства масса пустого самолета возросла на 6 т, что заставило экономить даже на массе балок пола в салоне и пассажирских кресел.

В сетевом графике производства постоянно возникали «переходящие» работы, которые не только сдвигались на более позднее время, но часто оказывались не на своем месте в производственной цепочке. Это касалось как узлов и деталей, не поставившихся в срок, так и просто незавершенных НИОКР по ряду комплектующих. Чтобы срыв графика по некоторым комплектующим не сказался на общем ходе работ, первые два опытных самолета компания «Боинг» планировала выполнить по «временной схеме», обещая доработать их позже.

К этому времени финансовые аналитики предсказали дальнейший рост затрат на НИОКР по самолету Боинг 787, и без того достигших 8 млрд долл.: «...практически всегда компания «Боинг» превышала смету затрат на разработку нового самолета, и в случае 787-го трудно ожидать другого».

Уже к концу 2006 г. стало очевидно, что график не выдерживается, в первую очередь, как казалось, по вине субподрядчиков. В начале 2007 г. компания «Боинг» заявила об отказе от установки на самолете беспроводной системы связи Wi-Fi, заменив ее на обычную, проводную. Главной причиной назвали сложность согласо-

ния частотного диапазона с рядом стран, а также требования FAA обеспечить необходимую безопасность от доступа посторонних лиц к системам самолета из пассажирского салона и из-за его пределов. Зато отказ от Wi-Fi позволил сэкономить почти 50 кг на весе оборудования.

Постепенно в прессу стали просачиваться слухи, что некоторых авиаперевозчиков предупредили о срыве сроков поставок ВС Боинг 787, хотя даже в начале 2007 г. компания «Боинг» категорически их опровергала, обещая поднять самолет в первый полет в августе того же года.

«Переходящие» работы все больше и больше сказывались на сроках сборки самолета в Эверетте. Он должен был собираться из уже готовых секций, но из-за спешки, нагнетаемой руководством компании «Боинг», они в основном приходили на завод без установленного оборудования, да еще покрытые многочисленными следами маркеров, стикеров и контрольных ленточек, обозначающих места, требующие доделки. Так, носовая секция № 41 поступила из Уичито без авиационного оборудования и систем кабины пилотов. Более того, многие узлы были скреплены временным «красным» крепежом. Неудачно переделанный крепеж повреждал пластиковую деталь, что требовало трудоемкого и долгого ремонта. По прибытии его следовало высверлить и заменить на нормальный крепеж. Ситуация осложнялась тем, что помимо возрастающих трудозатрат процесс удлинялся необходимостью перевода сопроводительной документации, часто поступающей на языке производителя почти со всех частей света (кроме Африки). Хотя документация переводилась, рабочие ей не очень доверяли, опасаясь серьезных последствий в случае возможных ошибок.

Компания «Боинг» в принципе предвидела проблемы из-за распределенного производства и направила представителей практически ко всем крупным контрагентам для контроля планов и качества работы.

По мере сборки первого опытного самолета число нестыковок различных узлов и оборудования только росло. Например, при соединении секций фюзеляжа № 41 и 43 выявился зазор 8 мм! Для сравнения: точность посадки центральной фюзеляжной секции на центроплан составила 0.0006 мм. Дефект секции оказался следствием нехватки крепежа для пластиковых деталей. Поэтому в секцию не установили ряд вспомогательных усиливающих элементов и оборудования. В результате ослабленная секция

при установке ее на транспортировочную «постель» деформировалась.

За несколько недель до выкатки первого опытного самолета стало очевидно, что не все проблемы удастся решить в приемлемые сроки. Впервые это стало заметно, когда компания «Боинг» решила сдвинуть сроки выпуска планера для ресурсных испытаний, чтобы дать производству 40—45 дополнительных рабочих дней. Более того, компания «Боинг» предупредила FAA, что планирует (по образцу концерна «Эрбас» в случае самолета А380) организовать линию по доработке выпущенных самолетов Боинг 787 на бывшей авиабазе «Келли» в Сан-Антонио (шт. Техас). Первоначально по результатам испытаний предполагалось доработать первые 11 самолетов, но по планам 2008 г. их число возросло до 20.

5 сентября 2007 г. компания «Боинг» заявила, что неготовность математического обеспечения, недостаток материалов (в первую очередь, крепежа, «дефицит которого не смогло предсказать никакое компьютерное моделирование», как заявил Майк Бейр) и задержка с выходом документации заставляют перенести первый полет на середину ноября. Правда, авиакомпания заверили, что поставки ВС будут осуществляться в срок.

Шесть дней спустя на проблему интеграции бортового оборудования указал и представитель фирмы «Ханиуэлл» на совещании инвесторов. Причем было отмечено, что вина лежит не только на фирме «Ханиуэлл». В том же ключе высказались представители других фирм. Фирма «Рокуэлл Коллинз» причиной задержки работ считала неспособность компании «Боинг» вовремя закончить конструкторские работы по самолету, что задерживало поставку оборудования.

Была опять же озвучена проблема с крепежом, которая оказалась более серьезной, чем предполагали. Разрешить ее планировалось только после выпуска 20-го самолета. Сама компания «Боинг» связывала недостаток метизов с быстрым ростом аэрокосмического сектора промышленности, за которым не успевают вспомогательные производства. После волны реорганизаций ряд фирм, например объединенный производитель метизов фирма «Алкоа», просто недооценил перспективы рынка и с 2004 г. практически не вкладывал средств в развитие производства. М. Бейр отметил, что производство метизов и так возросло с расширением выпуска самолетов Боинг 737 и 777,

не говоря уже о концерне «Эрбас», и поэтому появление на рынке нового самолета вызвало дефицит изделий, особенно новой номенклатуры. Впрочем, вину фирмы «Алкоа» в этом должна была разделить и сама компания «Боинг», которая разработала слишком сложный крепежный болт, к тому же переделанный по требованию FAA для обеспечения защиты от удара молнии. Правильная установка болта требовала достаточно квалифицированного персонала, что задерживало ход работ из-за постоянных ошибок на сборочных работах.

Уже к концу сентября 2007 г. масштабы проблем стали очевидны компании «Боинг», и она конфиденциально предупредила, в первую очередь китайские авиакомпании, заказавшие около 60 самолетов, что поставка в срок вряд ли возможна (китайцы очень рассчитывали на перевозку гостей Олимпиады в Пекине в 2008 г. на новых самолетах). 8 октября было официально заявлено о задержке работ минимум на 6 месяцев.

10 октября представители компании «Боинг» объявили, что первые 30—35 самолетов для 15 авиакомпаний будут поставлены с задержкой, хотя остальные ВС по-прежнему планировалось поставить в срок. До конца 2009 г. теперь предполагалось выпустить 109 самолетов (на 3 единицы меньше, чем ранее планировалось). Оптимизм добавляло успешное опробование математического обеспечения самолета на наземном тренажерном комплексе. Главной причиной задержки работ теперь называли необходимость доработки первого опытного самолета, которая заняла больше времени, чем предполагалось. Кроме того, выявились проблемы на фирме «Воут», где новое производство и вновь набранный персонал «требовали больше внимания».

16 октября 2007 г. сменили главного менеджера по программе самолета Боинг 787: место Майка Бейра занял Пэт Шенехен. До этого он возглавлял работы по завершению серии ВС Боинг 757, выпуску самолета Боинг 767-400ER, а еще раньше возглавлял ракетное подразделение оборонного сектора компании «Боинг». В частности, среди его успехов — преодоление задержек по работе над ракетным комплексом ПРО.

В первую очередь П. Шенехен решил «разобраться» со «слабой» цепочкой поставщиков. Через две недели после ухода со своей должности М. Бейр намекнул, что терпение компании «Боинг» не безгранично: «С некоторыми

из этих парней мы больше работать не хотим,... мы совершили кучу ошибок и многое поняли». Длинная цепочка поставщиков порождала безответственность, и теперь планировалось «консолидировать» производство, объединив сборщиков комплектующих с поставщиками узлов и материалов.

Кто оказался слабым звеном, стало ясно в ноябре, когда П. Шенехен отправил на фирму «Воут» специального представителя для надзора за выполнением работ по самолету Боинг 787. Ее руководство уже через неделю призналось, что «стоит перед лицом серьезных перемен».

Оказалось, что на фирме «Воут» даже отсутствует инженерный персонал для сопровождения проводимых работ. Сама компания «Боинг» сделала вывод о необходимости «дополнительного контроля для понимания, что реально происходит на этих производствах. Только имея адекватную оценку ситуации, мы можем помочь нашим контрагентам осознать рискованность сложившейся ситуации».

Важным для компании «Боинг» этапом работ должно было стать первое включение бортовых систем опытного самолета, назначенное на январь 2008 г. Это позволяло планировать первый полет на 31 марта 2008 г. и оставляло надежду начать поставку ВС авиакомпаниям до конца года. Но задержки в работе поставщиков продолжались, и 16 января компания «Боинг» официально объявила, что потребуется не менее двух месяцев только на то, чтобы понять объем проблем и установить новые сроки. В результате первое включение бортовых систем было перенесено на апрель.

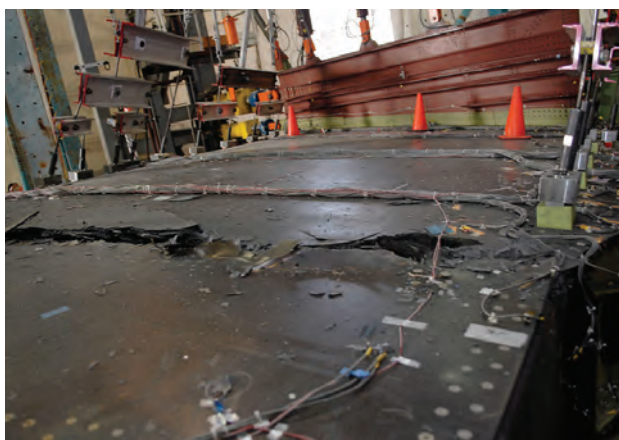
К этому моменту стали очевидны сложность технологической цепочки распределенного производства и рост затрат на согласование и организацию работ с поставщиками. «Мы ошибались, что сможем просто собирать самолеты из готовых комплектующих... и не предполагали, как много сил нужно приложить, чтобы все заработало», — заявил П. Шенехен.

Полная ревизия конструкции и реально поставленного оборудования привела к неутешительному заключению — взлетная масса самолета превысила расчетную величину на 8.5 т, а по сравнению с первоначальным проектом, утвержденным в 2004 г., — на 12 т. Превышение массы пустого самолета (в основном за счет конструкции планера) составило 5.7 т.

По иронии судьбы кризис в сборке первого опытного самолета совпал с существенным



Область необходимого усиления кессона крыла, выявленная по результатам статических испытаний в июле 2007 г.



Разрушение кессона крыла в ходе испытаний, ноябрь 2008 г.

ростом объема заказов на новые самолеты в 2007 г. — 1413 ВС (в 2006 г. — чуть больше 1000). Много среди них было заказов и на самолет Боинг 787, что только увеличило давление на производителей. Задержки также сказывались на работе поставщиков, которые по условиям соглашения с компанией «Боинг» должны были получить первые платежи только после сертификации самолета Боинг 787. Соответственно возникли трения по поводу пересмотра условий договора. Поставщики хотели получить деньги в 2008 г.

Первый реальный успех был достигнут в феврале 2009 г., когда на завод в Эверетте прибыла полностью укомплектованная носовая секция № 41 из Уичито. Секция предназначалась для второго опытного самолета Боинг 787 ZA002. Положительным было и то, что остальные секции фюзеляжа поступали уже в комплекте с необходимым оборудованием, по крайней мере на 50% больше, чем для самолета ZA001. Это позволило компании «Боинг» заняться отладкой собственно процесса сборки самолета.

В частности, она решила вернуться к проверенной ранее системе контроля качества, отмененной во время введения «экономичного» процесса сборки. Это позволило ликвидировать огромный поток нестыковок и несоответствий в узлах и комплектующих, поступающих на сборочную линию от сторонних поставщиков, с которыми рабочие сталкивались уже на сборке самолета. В результате обратно по цепочке поставщиков пошли новые чертежи и требования. Стало окончательно ясно, что без адекватного контроля производства, конструкторского сопровождения и надзора компании «Боинг» гарантирована бесконечная борьба с вновь выявляемыми недоработками и меняющимися требованиями.

Вскоре сказались последствия командировки представителей компании «Боинг» на завод фирмы «Воут». В марте 2008 г. компания «Боинг» решила просто выкупить за 55 млн долл. половину фирмы «Глобал Аэронаутика», принадлежавшей фирме «Воут», которой из-за финансовых трудностей срочно потребовались дополнительные средства. Правда, компания «Боинг» в результате этой сделки получила столь нужное производство по сборке центральной секции фюзеляжа. Вскоре завод в Южной Каролине стал первым неофициальным сборочным заводом фирмы за пределами Северо-Запада США. Значительно облегчился контроль за поставками, а персонал прошел переподготовку под руководством представителей компании «Боинг».

Но главные проблемы оказались впереди. На конференции финансистов банка JPMorgan было заявлено, что центроплан самолета Боинг 787 требует серьезной переделки и задержка может составить полгода. 20 марта компания «Боинг» попыталась смягчить ситуацию, заявив, что в процессе испытаний самолета это нормальное явление: «Мы выявили в процессе статических испытаний отдельные недостатки, которые требуют устранения,... но в целом расчетные характеристики подтверждены». Как оказалось, фирма «Фуджи» для экономии веса своего изделия уменьшила толщину лонжеронов, но явно перестаралась. Для устранения проблемы на лонжероны первых шести самолетов пришлось поставить усиливающие накладки. Все остальные самолеты должны были получить такие накладки уже в процессе производства.

9 апреля компания «Боинг» объявила о пересмотре всех производственных планов по выпуску самолетов Боинг 787-3 и 787-9 и об



Сборочная линия в Эверетте, май 2008 г.

отсрочке первого полета до конца 2008 г. Это было связано с медленным разворачиванием производства у поставщиков, постоянными переделками уже поставленного оборудования и узлов, а также с плохим планированием работ. Поэтому был разработан новый график поставки комплектующих на сборочную линию — более щадящий для производителей. Теперь планировалось выпустить: 25 самолетов в 2009 г., 69 — в 2010, 103 — в 2011 и 120 — в 2012 г. Поставки удлиненного варианта 787-9 перенесли на 2012 г., а укороченный вариант 787-3 был отнесен к перспективным разработкам после 2010 г.

Обратной стороной этого решения стало удорожание стоимости работ, что на фоне грозящих компании «Боинг» неустоек заставило ее вступить в переговоры с авиакомпаниями, чтобы минимизировать возможные потери.

Изменение производственных планов впервые вызвало официальную негативную реакцию у поставщиков компании «Боинг». Так, президент компании «Гамильтон» прямо обвинил компанию «Боинг» в том, что попытка выдержать срок выкатки первого самолета Боинг 787 в июне 2007 г. привела к полному срыву всех производ-

ственных планов. «Любая задержка вызвала у руководства компании «Боинг» панику и попытки любыми средствами заставить прислать необходимые узлы, даже если они еще не были готовы к поставке. В результате в цехах скопились десятки и сотни комплектующих и узлов без сопроводительной документации и должного оформления. И они еще попытались собрать вместе весь этот пазл!».

В мае 2008 г. началась сборка третьего опытного самолета ZA003. Сборочные секции для него поступали уже лучше укомплектованными, чем для предыдущих двух самолетов. Это позволило компании «Боинг» пригласить журналистов на сборочную линию, которая с тремя летными и одним ресурсным самолетами выглядела по-рабочему. Впрочем, всюду были видны следы штурмовщины — все свободное место было заставлено оборудованием и оснасткой, что больше напоминало сборочные линии 1960-х годов, нежели планируемое компанией «Боинг» «экономное производство XXI века». На пресс-конференции П. Шенехен отметил, что основные проблемы со сборкой уже преодолены и в настоящее время осуществляется доводка электри-



Сборка третьего опытного самолета ZA003 (N787BX), май 2008 г.

ческих систем самолета. «Технически сборочный цех уже пущен в работу», — заявил он. При этом количество бригад, занятых на устранении недоделок и доводке оборудования, постоянно сокращалось. С третьего самолета ZA003 предполагалось приступить к нормальной работе по сборке самолетов.

11 июня 2008 г. состоялось включение бортовых систем первого опытного самолета ZA001. Начались наземные испытания. Но очередная проблема пришла с другой стороны — на заводе



Первое включение систем, июнь 2008 г.

в Южной Каролине повредили фюзеляжную секцию № 44 для четвертого опытного самолета, неправильно соединив ее с центропланом. Крепежные детали разрушили конструкцию вокруг посадочных отверстий. Задержка работ составила пять недель.

Когда сборка самолета ZA001 практически завершилась, компания «Боинг» «неожиданно» выяснила, что срок договора с профсоюзом работников аэрокосмической промышленности истек. Предыдущая стачка в 2005 г. обошлась ей в 1,5 млрд долл. Но на сей раз переговоры осложнялись вопросами аутсорсинга и безопасности работ, что было напрямую связано с производством самолетов Боинг 787. Предложения компании были отклонены профсоюзом, и 6 сентября 2008 г. началась стачка.

Несмотря на забастовку, работы по самолету Боинг 787 были продолжены. В частности, провели испытания БРЭО, проверили салон на избыточное давление (150%). Тем не менее 10 октября появились сообщения о переносе даты первого полета на 2009 г., а начала коммерческой эксплуатации — на 2010 г. В дополнение ко всем этим неприятностям мировой финансовый кризис 2008 г. больно ударил и по компании «Боинг». После прекращения 1 ноября почти двухмесячной забастовки вновь встал вопрос о дате первого полета.

В декабре 2008 г. компания «Боинг» организовала работу круглосуточного центра по надзору за распределенным производством, чтобы увязать все процессы с помощью цифровых коммуникаций и осуществить мониторинг вплоть до погрузочных работ и отправки дальше по цепочке поставщиков.

ЛЕТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

12 мая 2009 г. на первом опытном самолете начались работы по подготовке к первому полету. Была запущена ВСУ APS 5000. Хотя ее прогонка заняла всего 15 мин, она стала чрезвычайно важным этапом, по иронии судьбы совпавшим с двухлетней годовщиной поставки этой ВСУ компании «Боинг» для установки на самолет. Теперь можно было переходить к гонке двигателей, первый запуск которых на самолете состоялся 21 мая того же года.

Все делалось, чтобы поднять самолет в воздух в конце июня 2009 г., успев к открытию авиасалона в Ле Бурже. Однако сроки вновь пришлось перенести, якобы, для более надежной проверки авиационных систем. Правда, проблема оказалась гораздо глубже. О ней знали только в группе статических испытаний, где во время тестов с повышенной нагрузкой обнаружили повреждение центроплана крыла в местах сочленения с фюзеляжем. Осмотр показал «отслоение» стрингеров от обшивки крыла в местах клевого соединения. От своих мест отходили полки 18 стрингеров как раз по сочленению фюзеляжа и центроплана. Сначала компания «Боинг» хотела обойтись небольшим объемом работы и поднять самолет в воздух хотя бы во время парижского авиасалона. Однако расчеты показали, что без подкреплений полет можно выполнить только по очень сокращенной программе, не получив никаких реальных данных для дальнейшей сертификации самолета, смысла торопиться не было. Требовалось провести не только доработки, но и повторные статические испытания.

Сами работы по усилению были сравнительно простыми, но главное, что насторожило конструкторов, — это расхождение результатов ком-

пьютерного моделирования крыла с реальными испытаниями под нагрузкой. Такой результат хорошо отражал те проблемы, с которыми столкнулась компания «Боинг» во время доводки самолета и разворачивания серийного производства в 2009 г.

Несмотря на новые задержки и рост стоимости НИОКР, ситуация в целом внушала оптимизм. Большой запас заказов позволил компании успешно пережить начало кризиса 2008 г. — только 6% заказов было отозвано к середине 2009 г. Планы достижения темпа выпуска 10 самолетов в месяц отодвинули до 2012 г. А на авиасалоне в Париже компания «Боинг» заявила об организации второй сборочной линии в Чарлстоне.

В июле 2009 г. компания «Боинг» приобрела за 1 млрд долл. завод фирмы «Воут» по производству хвостовой части фюзеляжа, а в декабре полностью выкупила завод фирмы «Глобал Аэронаутика» в Чарлстоне у корпорации «Алениа». Еще 1.2 млрд долл., вырученных от продажи завода в Уичито, были потрачены компанией на оснащение завода в Южной Каролине. Это позволило довести долю собственного производства компании «Боинг» в изготовлении узлов самолета до 35%.

Компания «Боинг» создала вторую сборочную линию самолетов Боинг 787 в Чарлстоне площадью 92 900 м² фактически под влиянием забастовки служащих осенью 2008 г. «Главное было не в благоприятном климате для бизнеса и не в необходимости платить людям за работу вовремя. Главным было не допускать перерыва в работе в течение трех лет», — заявил испол-



Первая рулежка первого опытного самолета ZA001 (N787BA), Эверетт, июль 2009 г.



Первая рулежка второго опытного самолета ZA002 (N787EX), Эверетт, сентябрь 2009 г.



Проект завода в Чарлстоне

нительный директор подразделения гражданской авиации компании «Боинг» Джим Элбау. Специально для этой сборочной линии было создано второе производство килей самолета, занимавшее площадь 3250 м². Первый киль планировалось поставить для третьего самолета, собранного в Южной Каролине. Начиная с 2013 г.



Оборудование в салоне самолета ZA001

общие мощности завода в Чарлстоне должны были обеспечить производство каждого третьего самолета — приблизительно три самолета в месяц.

Оставалось только довести самолет. Чтобы решить проблему ослабления центроплана, компания «Боинг» организовала из наиболее опытных инженеров и механиков специальную группу «проектирования, производства и сборки». В частности, поведение конструкции в местах разрушения исследовала группа специалистов вертолетного производства из Филадельфии. Было решено провести натуральное моделирование процессов разрушения крыла, что облегчило бы сертификацию композитных узлов самолета.

В течение июля и августа 2009 г. отработали несколько вариантов усиления центроплана. Главные доработки касались установки четырех новых металлических монтажных узлов (так называемых «водопроводных труб») по сторонам стрингеров центроплана в районе сочленения крыла и фюзеляжа. В стрингерах сделали U-образные вырезы, чтобы пропустить крепежные болты посередине полок стрингеров. Монтажные узлы центроплана увеличили и усилили.

Когда стало ясно, каким образом можно усилить центроплан, компания «Боинг» заявила о готовности выполнить первый полет к концу 2009 г. и начать поставки ВС авиакомпаниям с четвертого квартала 2010 г. Причем план составили уже с расчетом на возможные задержки. Он впервые был принят без скептицизма инвесторами.



Первый взлет первого опытного самолета, Эверетт, 15 декабря 2009 г.



Посадка первого опытного самолета в Сиэтле, 15 декабря 2009 г.

Дата выхода на темп производства 10 самолетов в месяц снова сдвинули — на этот раз до конца 2013 г. Было подтверждено, что опытные самолеты не будут сданы в эксплуатацию, так как их доводка и многочисленные изменения конструкции не позволяют гарантировать качество и безопасность авиаперевозок. Это означало, что средства, вложенные в три первых летных образца (2,5 млрд долл.), пойдут на удорожание всей программы разработки самолета.

11 ноября работы по усилению центроплана самолета ZA001 завершились. Одновременно дорабатывались статический экземпляр и второй летный экземпляр ZA002. Через 19 дней компания «Боинг» начала статические испытания усиленных элементов, а 10 декабря они были закончены с положительным результатом. 11 и 12 декабря

самолет ZA001 вывели на ВПП аэродрома Пейн-Филд для проведения скоростных пробежек.

Компания «Боинг» запланировала выполнить первый полет 15 декабря 2009 г. в 10 ч утра. Погода была плохой, но оставалась надежда на улучшение. У взлетной полосы собралось до 12 000 гостей. Как только образовался небольшой просвет в облаках, в 10 ч 27 мин пилот Майк Керрикер и бортинженер Ренди Невилл подняли самолет в воздух. Сопровождение осуществляли два самолета Локхид Т-33 и один самолет Боинг Т-38. Полет продолжался 3 ч 5 мин — его пришлось сократить почти на 2 ч из-за ухудшившейся видимости. В полете был выполнен ряд проверок оборудования, в том числе убраны и выпущены стойки шасси. Пилот после полета отметил хорошую управляемость самолета.



Посадка второго опытного самолета в Сиэтле, 22 декабря 2009 г.



Третий опытный самолет — ZA004 (N7874), Эверетт, 24 февраля 2010 г.



Самолет ZA003 во время климатических испытаний

Всего в летной программе испытаний были задействованы шесть самолетов. Второй — ZA002 — в окраске авиакомпании ANA взлетел с аэродрома Боинг-Филд 22 декабря 2009 г., третий — ZA004 — присоединился к летным испытаниям 24 февраля 2010 г., а за ним ZA003 — 14 марта 2010 г. 24 марта завершились испытания на флаттер, после чего были сняты ограничения на все режимы полета. 28 марта 2010 г. закончили статические испытания крыла на 150% расчетной нагрузки. Законцовки крыла при этом отгибались вверх на 7.6 м. До полного разрушения конструкции дело не дошло, и 7 апреля компания «Боинг»

заявила, что все расчетные характеристики подтверждены статическими испытаниями.

23 апреля начались испытания самолета ZA003 в климатической лаборатории Мак-Кинли на авиабазе Эглин (шт. Флорида), где проводилась подготовка самолета к полетам при температурах от -43 до $+40^{\circ}\text{C}$.

Первый самолет Боинг 787 с двигателями GENx (ZA005) был выкачен из цеха в мае 2010 г., а первый полет состоялся 16 июня. В этом же месяце самолет Боинг 787 впервые получил в полете удар молнии. Последующие исследования на земле показали, что у самолета не оказалось никаких повреждений.



Самолет ZA005 (N787FT) в первом полете, июнь 2010 г.



Сборка пятого опытного самолета

Впервые мировой авиационной общественности самолет Боинг 787 был представлен на выставке в Фарнборо в июле 2010 г.

2 августа на испытательном стенде компании «Роллс-Ройс» случилась авария с двигателем «Трент» 1000, что заставило компанию «Боинг» вновь перенести сроки передачи самолета в эксплуатацию, на этот раз до начала 2011 г. В результате впервые прозвучали требования авиакомпаний о компенсации за задержку поставок. 9 сентября было заявлено, что первые два серийных самолета должны присоединиться к летным испытаниям, но 10 сентября произошла очередная авария с ТРДД «Трент» 1000 на первом опытном самолете ZA001. 4 октября 2010 г. был облетан шестой опытный ZA006.



Шестой опытный самолет ZA006 (N787ZA)



Демонстрационный полет самолета Боинг 787 в Фарнборо, июль 2010 г.

5 ноября было заявлено о трехмесячной отсрочке поставки авиакомпаниям первых ВС. Причина — технические проблемы, выявленные в процессе испытаний. 9 ноября произошла первая аварийная посадка из-за пожара на борту самолета ZA002: после появления дыма и огня в кабине экипажа он приземлился в аэропорту Ларедо (шт. Техас). Причем непосредственно перед посадкой произошел отказ ряда систем самолета. Сразу после аварии компания «Боинг» приостановила полеты. Расследование показало, что короткое замыкание в электросети было вызвано попаданием постороннего предмета. Потребовалось внесение изменений в систему электропроводки и математическое обеспечение самолета, после чего с 23 декабря испытания продолжились. Это сдвинуло начало поставок ВС на третий квартал 2011 г. К 24 февраля 2011 г. план испытаний самолета с двигателями «Трент» 1000 был выполнен на 80%.

Еще в 2011 г. фирма «Боинг» запустила обширную программу снижения массы кон-

струкции. Расположенное в Гонконге независимое консультационное агентство «Эспайр Авиэйшн» утверждало, что ранние серийные самолеты (№ 7—19) имели избыточную массу в размере 6.1 т, в то время как самолеты № 20—33 были перетяжелены только на 4 т. Дополнительные меры по сокращению массы отдельных элементов конструкции планера предполагалось реализовать на самолетах № 34—50. В результате этих мер достичь первоначального целевого значения массы планера планировалось на 90-м серийном самолете.

С 4 июня 2011 г. самолет Боинг 787 неделю тестировали пилоты авиакомпании ANA. К 15 августа 2011 г. общий налет опытных самолетов достиг 4828 ч (1707 полетов). При этом в рамках тестирования в различных климатических зонах самолеты Боинг 787 побывали в 14 странах мира. 13 августа компания «Боинг» получила сертификат на двигатель «Трент» 1000, а 26 августа на церемонии в Эверетте ей были вручены сертификаты FAA и EASA на самолет.



Посадка самолета Боинг 787 в Ле Бурже, июнь 2011 г.

НАЧАЛО ПОСТАВОК И ПЕРВЫЙ ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Получение сертификата позволило компании «Боинг» приступить к реализации планов увеличения темпа выпуска с двух до десяти самолетов в месяц на заводах в Эверетте и Чарлстоне. Работы в Южной Каролине сильно затормозились после конфликта с Национальным бюро профсоюзов, которое 20 апреля 2011 г. заявило, что создание второй сборочной линии не соответствует предыдущим соглашениям с ним. Противоречия удалось преодолеть после заключения нового контракта с профсоюзом машиностроителей в декабре 2011 г. В результате первый самолет Боинг 787 покинул сборочный цех в Чарлстоне 27 апреля 2011 г.

Первый самолет Боинг 787 на торжественной церемонии в Эверетте был официально сдан авиакомпании ANA 25 сентября 2011 г. В аэропорт Ханеда в Японии он прибыл 27 сентября. Второй самолет поставили заказчику 13 октября.

Первый коммерческий рейс состоялся 26 октября 2011 г. по маршруту Токио (Нарита) — Гонгконг. Сроки начала эксплуатации самолета оказались сдвинуты на три года, точнее на 40 месяцев. Билеты на первый рейс продавались с аукциона, их стоимость доходила до 34 000 долл. за место. Всего на борту было 240 пассажиров (число мест в салоне 264).

Для местных авиалиний компания ANA заказала вариант салона с 12 местами в бизнес-классе при общей пассажировместимости 264 чел. Дальнемагистральные варианты имеют салон с 46 местами в бизнес-классе и 112 местами в эконом-классе.



Первый самолет, построенный в Чарлстоне

Представители фирмы «Боинг» признали, что первые самолеты Боинг 787 имели весьма значительное перетяжеление конструкции (по различным данным, от 6,5 до 10 т) и характеризовались повышенным расходом топлива. Сотрудник авиакомпании ANA тогда заявил, что первый полученный ею самолет Боинг 787-8 с избыточной массой будет эксплуатироваться только на внутренних авиалиниях.



Салон эконом-класса самолета JA801A



Первая посадка самолета Боинг 787 (JA801A) в Токио, 27 октября 2011 г.



Салон бизнес-класса самолета JA801A



Салон бизнес-класса, продемонстрированный на выставке в Дубае, ноябрь 2011 г.



Передний отсек отдыха экипажа

21 января 2012 г. авиакомпания ANA начала дальние полеты на ВС Боинг 787 в Германию. Перед этим двигатели компании «Роллс-Ройс» прошли доработку по «пакету В», позволившему улучшить топливную экономичность на 1%. Однако до конца января два рейса (NH204 26 января и NH203 30 января) были отменены из-за неполадок в системе закрылков и «отказа программного обеспечения» системы управле-

ния самолетом, соответственно. В эти дни авиакомпания была вынуждена поставить на маршрут ВС Боинг 777-200ER.

К концу января в парке авиакомпании ANA находилось пять самолетов Боинг 787, но только один из них мог выполнять дальние перелеты — самолет JA805A (31-й серийный самолет), рассчитанный на 158 мест. Авиакомпания получила его 30 декабря 2011 г. и официально ввела в строй 14 января 2012 г. на маршруте Токио — Пекин.

В июле авиакомпания ANA на время вывела из эксплуатации три ВС Боинг 787 после обнаружения проблемы с двигателями «Трент» 1000. Ее пресс-секретарь Ресей Номура отметил, что такие же проблемы обнаружили на семи двигателях пяти самолетов, включая ВС, поставленное в конце июня. Причина — непредвиденная коррозия внутри коробки приводов.

По утверждению представителей авиакомпании ANA, топливная эффективность нового самолета оказалась на 20% лучше, чем у ВС Боинг 767, а на дальних маршрутах между Японией и Франкфуртом — даже на 21%. Готовность к вылету в течение первых 2.5 месяцев эксплуатации составила 96.5% при интенсивности два полета в день продолжительностью 80—90 мин. Авиакомпания также провела опрос более 800 пассажиров, летавших на самолете Боинг 787, согласно которому ожидания пассажиров совершить комфортабельный полет оправдались у 90% опрошенных. 90% пассажиров отметили высокое качество кондиционирования воздуха, 80% — его нормальную влажность, 40% — высоту потолка салона, 90% положительно высказались за иллюминаторы большого размера. 25% опрошенных сказали, что они бы в дальнейшем сделали все возможное для того, чтобы вновь полететь на самолете Боинг 787.

В целом начальный этап эксплуатации прошел достаточно гладко. Единственным серьезным инцидентом стал отказ гидравлического клапана в системе выпуска шасси 6 ноября 2011 г. Тогда выпустить основные стойки шасси при подлете к аэропорту Окаяма удалось не с первой попытки. К концу января авиакомпания ANA перевезла 100 000-го пассажира на самолетах Боинг 787, надежность составила 96.3% (в среднем для авиакомпании — 96.5%).

28 февраля 2012 г. Национальная ассоциация воздухоплавания (NAA) вручила компании «Боинг» два сертификата на рекорды, установленные в кругосветном перелете самолета ZA006



Посадка самолета ZA006 после рекордного полета

(с двигателями GEпх-1В) 6—8 декабря 2011 г. Взлетная масса при старте из Сиэтла составляла 212 000 кг (103 000 кг — топливо). Шеф-пилот отделения «Боинг — Коммерческие самолеты» Род Скэр назвал полет в Бангладеш «восхитительно скучным». Самолет приземлился там с остатком топлива 13 600 кг, преодолев 19 814 км. NAA зафиксировала дальность 19 121 км. (Прежний рекорд в классе самолетов с массой 200—250 т принадлежал самолету Эрбас А330 — 16 885 км, 2002 г.)

Стоянка в столице Бангладеш продолжалась 1 ч 52 мин. За это время самолет посетили 200 чел., было заправлено 86 000 кг топлива. Самолет вернулся в Сиэтл с остатком топлива 9080 кг. Кругосветное путешествие продлилось 42 ч 26 мин. В последние 6 ч полета самолет достиг крейсерской скорости, соответствующей числу $M = 0.88$.

В конце 2011 г. компания «Боинг» предприняла четыре рекламных тура самолета Боинг 787 по городам Китая, Африки, Среднего Востока и Европы.

В апреле 2012 г. во время рабочего рейса из Сиэтла в Токио самолет Боинг 787 впервые был заправлен смесью обычного керосина и биотоплива.

13 ноября 2011 г. компания «Боинг» получила первый самолет Боинг 787, прошедший предпродажную доработку на базе «Лекленд» в Сан-Антонио, на что потребовалось 8 месяцев. Самолет предназначался для японской авиакомпании JAL. Доработка уже выпущенных самолетов проводилась согласно «гибкому» плану компании «Боинг», чтобы не прерывать работу основной сборочной линии. Она предусматрива-



Первая заправка самолета биотопливом

ла замену систем и узлов, не удовлетворяющих своим спецификациям. Так, на самолете авиакомпании JAL проводилась доработка системы кондиционирования бортовых систем, включая мотор вентилятора, вентилятор и математическое обеспечение. Дорабатывалась также система управления, закрылки, флапероны и рули. Согласно замечаниям, полученным после пожара на опытном самолете ZA002, была доработана электропроводка самолета.

В 2011 г. случился очередной сбой с поставками. На этот раз самолетов Боинг 787-8 с двигателями GEпх-1В, которые не смогли вовремя получить сертификацию. FAA потребовало провести дополнительные 300-часовые испытания уже на первых серийных самолетах. Опытный самолет ZA005 при этом использовался для испытаний двигателей после первого пакета модернизации (PIP 1) — увеличение числа лопаток турбины низкого давления, что позволило поднять топливную эффективность на 1.4%. В результате в течение 2011 г. компания «Боинг»



Первый самолет авиакомпании JAL

смогла поставить заказчикам только три ВС с двигателями компании «Роллс-Ройс».

В марте 2012 г. два первых ВС Боинг 787 (самолеты 33 и 23, регистрационные номера JA825A и JA822A) получила авиакомпания JAL (с компоновкой салона на 186 кресел). Они прибыли в Токио из Сиэтла 26 марта 2012 г. Первый коммерческий рейс был намечен на 22 апреля по маршруту Токио — Бостон. До конца мая авиакомпания JAL намеревалась начать полеты новых ВС в Пекин, Дели, Сингапур и Москву, а до конца года, после поступления дополнительных самолетов, — в Сан-Диего и Хельсинки.

На начало 2012 г. темп сборки составил 2,5 самолета в месяц, поэтому планы достижения темпа производства 10 самолетов в месяц были вновь отодвинуты — до конца 2013 г. Очередная задержка произошла из-за обнаруже-

ния расслоения обшивки хвостовой секции фюзеляжа (№ 48) из-за неправильной установки лонжеронов. Пришлось проводить инспекцию и доработку 50 самолетов и готовых секций.

В апреле 2012 г. представители компании «Боинг» заявили о прекращении серьезных доработок серийных самолетов по результатам проведенных испытаний. Конструкция планера в целом теперь удовлетворяла предъявляемым требованиям. Одновременно компания заявила о снижении к июлю 2012 г. издержек на производство одного самолета почти на 50% по сравнению с первым серийным ВС, поставленным авиакомпании ANA. Этому способствовало то, что на заводе в Эверетте был выпущен первый самолет (№ 66), не требующий доработок. По оценкам специалистов, его себестоимость составила 186 млн долл. при каталожной



Первый самолет авиакомпании «Эйр Индия» вылетает в Нью-Дели

(на тот момент) цене 193.5 млн долл. Снижение себестоимости тем не менее не означало достижения окупаемости проекта. Полной окупаемости вложенных затрат планируется достичь только к 2020 г. после продажи 1100 самолетов.

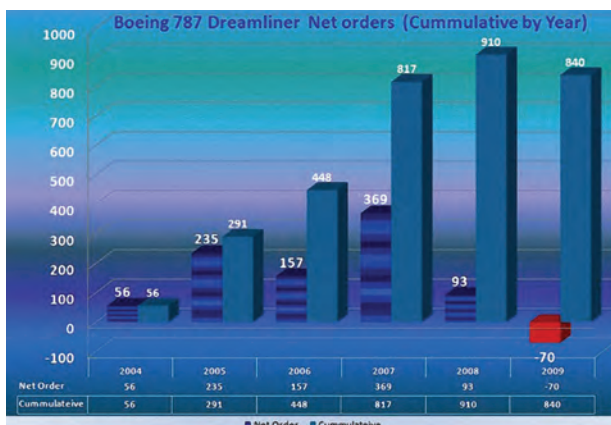
В таких условиях настоятельной необходимостью было расширение производства, особенно это касалось введения в строй второй сборочной линии в Чарлстоне. 23 мая был поднят в воздух первый самолет Боинг 787-8 (№ 46), собранный в Южной Каролине. Он предназначался для индийской авиакомпании, ситуация с поставками которой была осложнена ее требованием компенсации возникших задержек.

Вскоре задержка с поставками повлияла на число заказов: авиакомпания «Куантас» отказалась от закупки 35 самолетов Боинг 787-9 на сумму 8.5 млрд долл. (в 2009 г. катарская авиакомпания уже отказалась от 15 ВС Боинг 787). Китайская авиакомпания «Чайна Истерн» вместо 24 самолетов Боинг 787 решила купить 45 самолетов Боинг 737. Всего с 2009 г. компания «Боинг» потеряла заказы на 216 самолетов Боинг 787. Поэтому, несмотря на заключение новых контрактов, в течение 2012 г. общий пакет заказов сократился на 7 ВС.

В сентябре 2012 г. с целью расширения производства японская фирма «Фуджи» запустила третью сборочную линию по производству кессонов крыла. К этому времени производство комплектующих выросло до пяти самолето-комплектов в месяц, а на 2013 г. было запланировано достижение темпа семь комплектов в месяц. Тем не менее поставки самолетов, в первую очередь американским авиакомпаниям, продолжались с задержками.

Проблему с задержками объяснил Пэт Шенехен (к тому времени вице-президент компании «Боинг», отвечающий за авиационные программы): «Сбои в работе цепочки поставщиков, которые привели к трехлетней задержке выхода самолета на авиалинии, все еще сказываются на его выпуске. Узким местом производства является то, что десятки почти готовых самолетов требуют доработки или модернизации. Фактически справиться с последствиями плохой работы субпоставщиков компания «Боинг» сможет только к началу 2015 г.!».

Первый серьезный инцидент с самолетом Боинг 787 случился 9 ноября 2010 г. — из-за короткого замыкания серьезно пострадал от огня второй опытный самолет ZA002, который позже пришлось списать.



Рост числа заказов на самолет Боинг 787

Первый инцидент с первым серийным ВС Боинг 787 произошел через неделю после начала регулярной эксплуатации (6 ноября 2011 г.) — во время захода на посадку не полностью выпустились основные стойки шасси. По команде с земли шасси были довыпущены на втором заходе с помощью резервной гидравлической системы. Причиной отказа оказался гидравлический клапан, вскоре замененный.

21 июля авиакомпания ANA прекратила полеты пяти из 11 имеющихся на тот момент ВС Боинг 787-8 из-за проблем с редуктором в ТРДД «Трент» 1000. Ресурсные наземные испытания, проводившиеся компанией «Роллс-Ройс», выявили коррозионное разрушение зубьев редуктора, которые могли привести к его полному отказу. Компания была вынуждена изменить технологический процесс изготовления деталей редуктора, а также провести обследование выпущенных двигателей. Следы коррозии обнаружили на ряде двигателей, что потребовало приостановки полетов. Два из пяти самолетов Боинг 787-8 удалось оперативно отремонтировать в течение суток, работа на оставшихся ВС заняла несколько дней.

28 июля произошел инцидент с двигателем GENx-1B. Во время его гонки на самолете Боинг 787-8 (аэродром Чарлстон) из сопла вылетел обломок лопатки турбины, который поджег траву на аэродроме. Пожар продолжался целый час. В результате корпорация «Дженерал Электрик» пришлось провести дополнительную проверку двигателей, так как наиболее вероятной причиной аварии первоначально посчитали неправильную сборку турбины низкого давления.

12 сентября 2012 г. американское бюро безопасности на транспорте (NTSB) потребовало временно прекратить эксплуатацию самолетов

Боинг 787 с двигателями корпорации «Дженерал Электрик» до устранения выявленных проблем. Анализ поврежденной лопатки показал, что поломка была вызвана не усталостными разрушениями, как предполагали, а коррозией гальванической пары во влажной среде в присутствии водорода. Сам факт коррозии выявился ультразвуковым обследованием двигателя 15 августа, но до следующего инцидента с разрушением лопатки турбины он не оглашался публично. Шесть недель спустя после аварии самолета Боинг 787-8 во время взлета ВС Боинг 747-8 с такими же двигателями GE9x-1 (налетавшего 1200 ч) на скорости 80 км/ч произошло резкое падение тяги двигателя № 1. Экипажу пришлось прервать взлет, а обследование показало значительные повреждения турбины низкого давления. Корпорация «Дженерал Электрик» была вынуждена сменить технологию нанесения защитного покрытия на лопатки турбины, заменить состав смазки среднего вала двигателя и провести ультразвуковое обследование всех выпущенных двигателей.

5 сентября произошел инцидент с первым опытным самолетом. Во время рулежки перед взлетом неожиданно упало давление в гидросистеме — отказал гидравлический насос. Визуально экипаж обнаружил дым в районе левого двигателя. Пассажиры и экипаж были срочно эвакуированы по аварийным трапам.

4 декабря самолет американской авиакомпании «Юнайтед Эйрлайнз» совершил вынужденную посадку из-за отказа электрической системы — вышел из строя один из генераторов. 9 декабря с такой же проблемой было поставлено на прикол третье, только что поставленное катарской авиакомпанией ВС, что вызвало бурное недовольство авиакомпании «Катар Эйрвейс». В дальнейшем она станет одним из главных критиков качества поставляемых ей самолетов компании «Боинг».

Вал технических проблем постепенно нарастал. На рубеже 2012—2013 гг. вышел доклад чилийской авиакомпании LAN, посвященный надежности ВС Боинг 787. По ее данным, показатель надежности ВС оказался ниже, чем у других типов самолетов авиакомпании. Особые проблемы вызывали двигатели «Трент» 1000, электросистема и система кондиционирования. Хотя чилийцы были к этому частично готовы (все же они осваивали новый самолет), в докладе высказывалось настойчивое требование довести техническую надежность ВС до заявленной.



Самолет Боинг 787 после аварийной посадки в аэропорту Такамацу

Низкая техническая надежность самолета Боинг 787 заставила авиакомпанию «Юнайтед Эйрлайнз» отменить ряд международных рейсов.

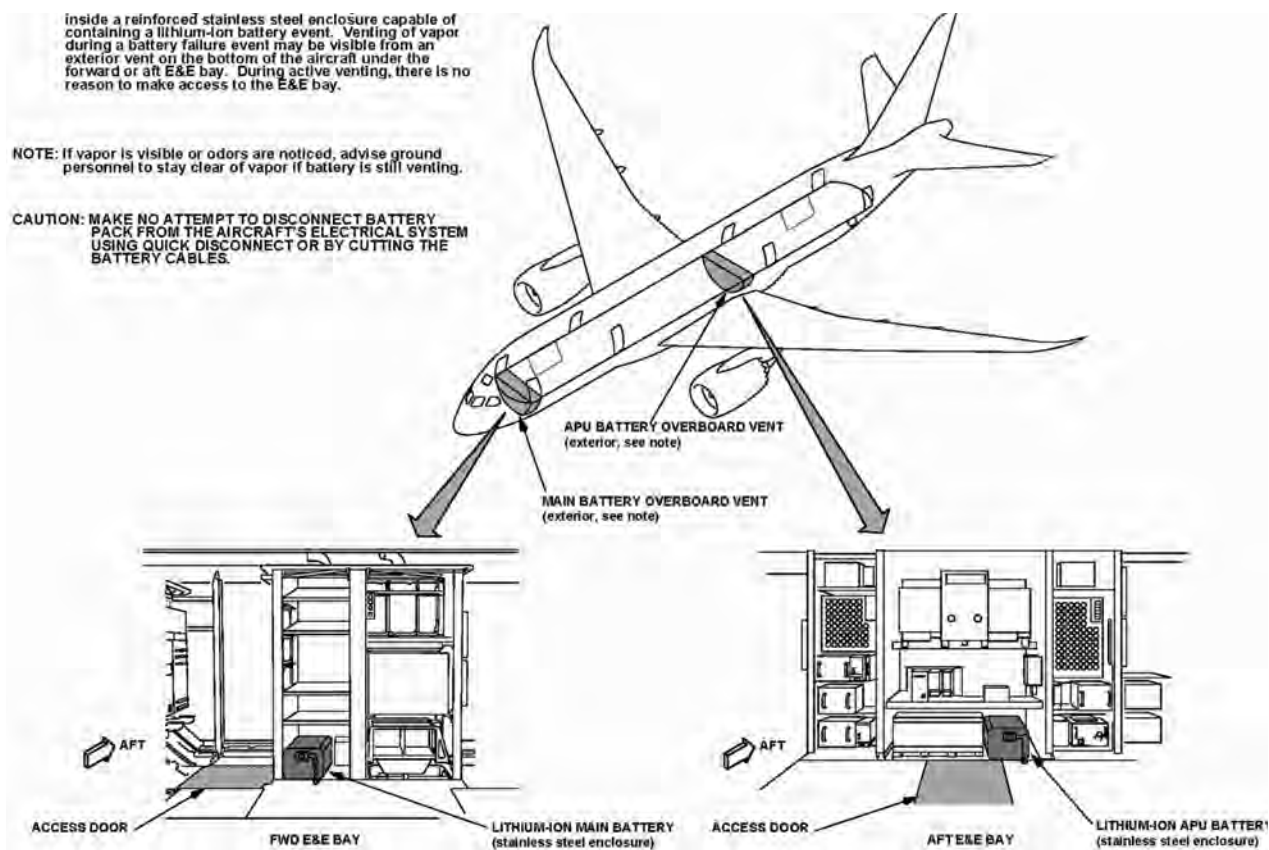
8 января 2013 г. был прерван полет самолета Боинг 787 авиакомпании JAL в Бостон из-за утечки топлива. 11 января обнаружили утечку топлива еще на одном самолете. 13 января выявили третью утечку топлива за неделю — текли сразу несколько клапанов, причем оперативно выявить причину утечки топлива не удалось.

11 января появился доклад FAA, где критически был рассмотрен ряд вопросов по авиационным системам, техническим решениям, качеству производства и сборки самолетов Боинг 787, в котором, по утверждению представителя NTSB, попытались найти «корни возникших проблем». Правда, представитель FAA отметил, что «это не означает, что самолет не безопасен».

Постепенно обстановка вокруг самолета стала накаляться, что и привело к беспрецедентному, за последние 20 лет в истории авиаперевозок, запрету на полеты американского самолета.



Возгорание в заднем отсеке самолета авиакомпании JAL, Бостон



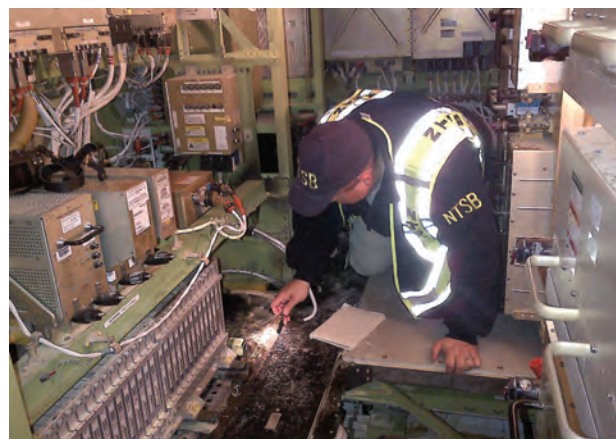
Размещение аккумуляторных батарей на самолете

16 января 2013 г. на ВС Боинг 787 авиакомпании ANA, совершавшем рейс по маршруту Убе — Токио (Ханеда), сработала система предупреждения о пожаре. Самолет совершил вынужденную посадку в аэропорту Такамацу, пассажиры были эвакуированы, при этом несколько человек получили легкие ранения. Сходный инцидент случился с ВС авиакомпании JAL на стоянке в аэропорту Бостона. Осмотр выявил возгорание бортовой батареи с «языками пламени высотой до 8 см, которое трудно погасить». Терпение японских авиакомпаний ANA и JAL лопнуло, и с 16 января они совместно прекратили эксплуатацию ВС этого типа.

Практически одновременно FAA наложило запрет на полет самолетов Боинг 787 в США, что стало беспрецедентным решением с 1979 г. Запрет на полеты ВС этого типа вскоре последовал по всему миру. Всего на прикол было поставлено 50 самолетов.

Первоначально заявили о «выбеге температуры» батареи из-за ее перезаряда, но японские авиакомпании отметили, что напряжение на батарее перед аварией было ниже номинального — батарея была фактически разряжена. Хотя

компания «Боинг» считает, что «возможно, причины возгорания никогда до конца не будут выявлены», можно предположить исходя из развития событий, что главной причиной короткого замыкания в одном из аккумуляторов батареи стал так называемый «обратный заряд», т. е. ток через аккумулятор тек в обратном направлении из-за «переполюсовки» (смена знака) на его клеммах. Косвенно это подтверждается обеща-



Специалист NTSB осматривает аккумуляторную батарею, Бостон, 8 января 2013 г.



Сгоревшая и целая аккумуляторные батареи



Вице-президент отделения «Боинг — Коммерческие самолеты» представляет новую конструкцию батареи на пресс-конференции в Токио, 15 марта 2013 г.

нием компании «Боинг», что в дальнейшем аккумуляторы в батарею будут подбираться более жестко по схожим физическим параметрам. Именно работа батареи в напряженных режимах зарядки и разрядки при невыровненности напряжения на аккумуляторах ведет к «обратному заряду».

В результате FAA выдвинуло жесткие требования по сертификации обновленной батареи. Впервые было предписано выполнить рекомендации Радиотехнической комиссии по авионавигации (RTCA). Компания «Боинг» отметила, что в тот момент, когда в 2000-х годах самолет Боинг 787 только разрабатывался, их просто не было. В данном случае сказалась попытка компании «Боинг» «заморозить» сертификационные требования к самолету на уровне 2003 г.

Проводя свое расследование, NTSB среди выявленных недостатков обнаружило, что про-

изводитель системы электропитания самолета (фирма «Талес») не провел окончательных испытаний с реальной аккумуляторной батареей, а использовал имитатор электрической нагрузки. Причем такое решение было принято именно вследствие возгорания аккумуляторных батарей в процессе проведенных до этого тестов. В докладе, составленном NTSB, отмечалось, что аккумуляторный блок питания работает не в том режиме, который первоначально предусматривали фирмы «Боинг» и «Талес». В частности, ток разряда не был постоянным, как зафиксировано в документах, а характеризовался резкими скачками в короткие промежутки времени. Кроме того, согласно докладу NTSB, электронные системы, отвечающие за правильный режим заряда батареи и контроль ее параметров, содержали в себе многочисленные недостатки. В целом сказались сложность и большая напряженность работы бортовой электросети самолета.

Поскольку принимаемые компанией «Боинг» меры по улучшению качества поставляемых ему аккумуляторных батарей и ее доработки в плане снижения вероятности перегрева не сняли проблему пожароопасности литий-ионных батарей, было принято «лобовое» решение: батарейный отсек «бронировать» нержавеющей сталью толщиной 3 мм, гарантирующей от прогара в случае пожара, по крайней мере, в течение 3 ч, пока самолет не достигнет ближайшего аэропорта, отсек батареи оборудовать вентиляционным отверстием для вывода за борт газообразных продуктов горения. Всего в доработке самолетов по всему миру участвовало 300 специалистов компании «Боинг».

Модернизация батареи позволила 27 апреля 2013 г. возобновить эксплуатацию ВС Боинг 787. Первой это сделала эфиопская авиакомпания. И именно на самолете этой авиакомпании произошел следующий инцидент с литий-ионной батареей. 12 июля, находясь в аэропорту Хитроу, самолет получил серьезные повреждения обшивки из-за возгорания в хвостовой части фюзеляжа, что фактически вывело его из строя. Расследование показало, что виной был литий-ионный аккумулятор в аварийно-спасательном маяке Ханиуэлл Rescu-406AFN. Всего на борту самолета находятся два таких устройства. Предположительной причиной возгорания батареи назвали короткое замыкание проводки из-за неправильной укладки жгутов (переобжим проводов). Корпорация «Ханиуэлл» настаивала на крайне редком стечении обстоятельств, так как по всему



Прогорание обшивки на самолете эфиопской авиакомпании, аэропорт Хитроу

миру эксплуатируется 4600 подобных аварийных передатчиков без серьезных нареканий.

Нужно отметить, что нахождение потенциально пожароопасной аккумуляторной батареи на борту пассажирского самолета многие авиаспециалисты восприняли крайне негативно. В частности, концерн «Эрбас» сделал свои выводы: литий-ионные батареи на борту самолета A350 срочно заменили на предыдущее поколение аккумуляторов — никель-кадмиевые.

Дополнительно возникла сложная проблема ремонта эфиопского ВС. Компания «Боинг» явно не ожидала, что проблема ремонта композитной конструкции возникнет так быстро.

В конце концов, остановились на варианте замены одной из фюзеляжных секций. Ремонт, потребовавший в том числе и демонтаж киля самолета, осуществлялся в аэропорту Хитроу в течение пяти месяцев. Поврежденная фюзеляжная секция была вырезана и заменена на новую, подкрепленную дополнительными стрингерами. В воздух самолет вновь поднялся 23 декабря 2013 г.

Тем не менее проблемы с электрооборудованием продолжали преследовать самолет. В ноябре 2013 г. представитель компании «Боинг» признал, что хотя общая готовность парка (почти 100 ВС) достигает 97%, для некоторых самолетов этот показатель заметно ниже. Приблизительно треть отказов связана с ошибками в работе математического обеспечения. В частности, постоянные ложные срабатывания систем безопасности полета заставили норвежскую авиакомпанию поставить на прикол один из трех своих самолетов Боинг 787.

В октябре произошли два серьезных отказа на самолетах авиакомпании JAL. 9 октября во время вылета из аэропорта «Домодедово» отказала часть бортовой электросети, из-за чего перестали работать туалеты. Самолету пришлось вернуться в аэропорт. Одновременно во время вылета из Сан-Диего на самолете Боинг 787 произошел отказ антиобледенительной системы одного из двигателей. Хотя отказы электрооборудования удалось оперативно устранить, задержка вылетов оказалась значительной.



Для ремонта самолета в аэропорту Хитроу пришлось создать целый завод, ноябрь 2013 г.



Техническое обслуживание самолета авиакомпании JAL

14 января 2014 г. произошел очередной инцидент с главной аккумуляторной батареей самолета Боинг 787 в японском аэропорту Нарита. На стоянке экипаж обнаружил дым и утечку жидкости из дренажного отверстия аккумуляторного отсека. «Бронирование» отсека позволило локализовать возможное возгорание, а сработавший на аварийном аккумуляторе предохранительный клапан — избежать повреждения всей батареи. При этом окончательный отчет о причинах выхода из строя аккумуляторных батарей NTSB должно было выпустить только в марте 2014 г., т. е. спустя более года после первого серьезного инцидента.

В конце октября 2013 г. авиакомпания JAL объявила о решении снять ВС Боинг 787 с международных маршрутов Токио — Дели и Токио — Сингапур и пока не ставить самолеты на рейсы в Сидней. Данное решение было принято после рекомендации компании «Боинг» не использовать самолеты с двигателями GE_x вблизи грозовых очагов. Причиной стала потеря тяги ТРДД GE_x самолета Боинг 747-8 при пролете кучево-дождевого облака. Авария случилась 31 июля 2013 г. с двигателями GE_x-2В самолета

Боинг 747-8 во время полета по маршруту Москва — Гонгконг. Самолет попал в облако, незафиксированное бортовым метеорологическим локатором, при этом упала тяга и самопроизвольно выключились два двигателя. После посадки при обследовании двигателей было обнаружено повреждение лопаток компрессора высокого давления на трех двигателях. Расследование показало, что при определенных «неожиданных» и «непредсказуемых» погодных условиях в тропической климатической зоне на необогреваемых узлах компрессора начинается обледенение. Дальнейшее расследование выявило в период с апреля по ноябрь 2013 г. шесть случаев повреждения двигателей в результате обледенения.

Корпорация «Дженерал Электрик» планировала решить проблему повреждения лопаток компрессора льдом, доработав цифровую систему управления двигателем (FADEC), рассчитанную на защиту двигателя от попадания птиц и камней, но не льда. Возникла идея использовать систему перепуска воздушного потока перед компрессором, которая в нужный момент направляет кристаллы льда мимо лопаток. Для

разработки алгоритма работы системы FADEC были использованы данные почти 12 000 ч налета двигателя. FADEC должна быть также доработана для обнаружения присутствия кристаллов льда в воздушном потоке. Введение нового математического обеспечения было запланировано на первый квартал 2014 г.

На таком фоне не удивительно, что авиакомпания JAL, до того покупавшая практически исключительно самолеты компании «Боинг», буквально через неделю после этих событий решила купить самолеты Эрбас А350. Они будут первыми ВС концерна «Эрбас» в истории авиакомпании JAL, что само по себе показывает насколько изменилась ее позиция в результате опыта эксплуатации самолетов Боинг 787.

В аналогичном ключе высказалось и руководство катарской авиакомпании, которое, в частности, отметило, что продолжение закупок самолетов Боинг 787 и перевод опционов в твердый заказ напрямую зависят от того, сможет ли компания «Боинг» устранить недочеты и неисправности: «Там слишком много детских болезней. Они, правда, далеко не всегда мешают выполнению полетов, но вызывают беспокойство персонала». Поэтому авиакомпания заказала большее число самолетов А350, ожидая, что европейский самолет окажется еще и более экономичным.

8 ноября 2013 г. последовал очередной отказ вспомогательной аккумуляторной батареи на самолете авиакомпании JAL при вылете из Хельсинки. Сработал сигнал тревоги, хотя параметры электропитания остались в норме. Последнее позволило закончить полет, но после осмотра зарядное устройство батареи было демонтировано и отправлено производителю.

В таких условиях FAA и NTSB заявили о готовности закончить работу по своим докладам, посвященным электрооборудованию самолета Боинг 787. Первоначально планировалось, что тема доклада ограничится аккумуляторными батареями, но руководство FAA настояло на более широком «критическом обзоре» электрооборудования.

Осенью 2013 г. развернутую критику самолета Боинг 787 дал вице-президент концерна «Эрбас» Джон Лихи, который прямо указал, что надежность самолета Боинг 787 оказалась заложником «часто призрачных достоинств новых авиационных систем и оборудования». По его утверждению, главной идеологией создания самолета Боинг 787 стало максимальное использование всех новинок. Но когда это пре-



Стоянка завода в Эверетте, сентябрь 2013 г.

вратилось в самоцель, то обернулось большими проблемами с надежностью и обслуживанием. Например, касаясь автономной системы кондиционирования, Д. Лихи отметил: «Мы не думаем, что на высоте 13 000 м и при наружной температуре -60°C следует использовать электрическую систему наддува, так как мы уже имеем избыточную мощность двигателя, которую можно практически даром применять для наддува и обогрева кабины и оборудования».

Аналогичная ситуация складывается и с электроприводом тормозов шасси. По мнению Д. Лихи, при создании самолета А350ХWB инженеры концерна «Эрбас» трижды пытались решить проблему электропривода, но, в конце концов, остановились на гидравлических тормозах. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по программе самолета А350 убедили инженеров концерна «Эрбас», что «создание чисто электрического самолета ведет не к его надежности, а к излишней сложности систем, их утяжелению и к проблемам с обслуживанием».

Заказы и поставки самолетов Боинг 787 (по данным компании «Боинг» на ноябрь 2013 г.)

Заказчик	787-8	787-9	787-10	Всего	Двигатели GE9x	Двигатели «Трент»	Поставлено
«Аэрофлот»	24			24			
Aeromexico	2			2	*		
Air Astana	3			3		*	
Air Berlin	15			15			
Air Canada	37			37	*		
Air China		15		15		*	
Air Europa	8			8		*	
Air France-KLM		25		25			
Air India	27			27	*		10
Air New Zealand		10		10		*	
Air Niugini	1			1		*	
ALAFCO	8			8	*		
ALC		15	30	45			
All Nippon Airways	36	30		66		*	23
Arik Air		7		7	*		
Avianca	12			12		*	
Aviation Capital Group	5			5			
Azerbaijan Airlines	2			2	*		
Biman Bangladesh Airlines	4			4			
British Airways	8	16		24		*	4
Business Jet / VIP	2	3		5	2		
China Southern Airlines	10			10	*		5
CIT Leasing Corporation	10			10	2		
Delta Air Lines	18			18		*	
Ethiopian Airlines	10			10	*		5
Georgian Airways		2		2	*		
Etihad Airways		41	30	71	*		
GECAS			10	10	*		
Gulf Air	16			16			
Hainan Airlines	10			10	*		4
Icelandair	1			1		*	
ILFC	33	41		74	9	8	5
Japan Airlines	25	20		45	*		12
Jet Airways	10			10			
Kenya Airways	9			9	*		
Korean Air	1	10		11	*		
LAN Airlines	22	4		26		*	5
LCAL	5			5		*	
LOT Polish Airlines	8			8		*	5
Nakash	2			2		*	
Norwegian Air Shuttle	3			3		*	1
Oman Air	6			6			
PrivatAir	2			2			
Qantas	14			14	*		1
Qatar Airways	30			30	*		9
Republic of Iraq	10			10			
Royal Air Maroc	4			4	*		
Royal Brunei Airlines	5			5	*		2
Royal Jordanian	7			7	*		
Saudia		8		8			
Singapore Airlines	10	10	30	50			
«Трансаэро»	4			4		*	
Travel Service	1			1			
TUI Travel PLC	13			13	*		4
United Airlines	21	24	20	65	25		8
Uzbekistan Airways	2			2	*		
Vietnam Airlines		8		8			
Virgin Atlantic Airways		16		16		*	
Xiamen Airlines	6			6		*	
Неназванные заказчики	3	13		16			
Итого	496	396	120	1012			103

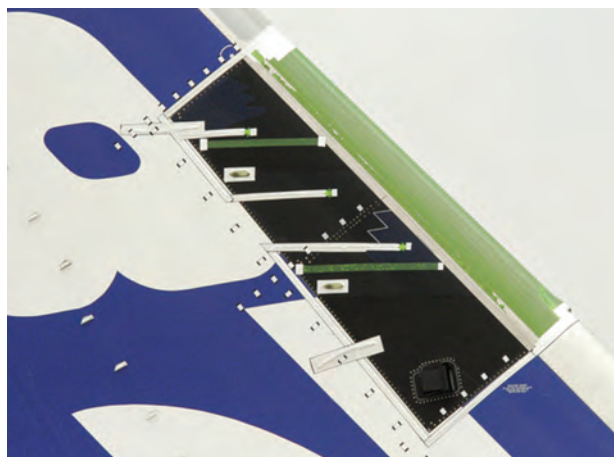
МОДИФИКАЦИИ

787-3. Нереализованный вариант для региональных перевозчиков с дальностью полета, уменьшенной до 4600—5600 км за счет большей пассажироместимости — до 290 кресел. Самолет не пользовался успехом, число заказов не превысило 43 и позже их переформили на вариант 787-8. 13 декабря 2010 г. работы по модификации 787-3 были остановлены из-за отсутствия каких-либо перспектив.

787-9. Первая удлиненная модификация, рассчитанная на перевозку 250—290 пассажиров на расстояние 14 800—15 750 км. От базового варианта отличается удлиненным до 63 м фюзеляжем, увеличенными запасом топлива и взлетной массой при том же размахе крыла. Информацию о начале разработки этого варианта компания «Боинг» обнародовала на выставке в Сингапуре. Вице-президент компании «Боинг» по маркетингу Рэнди Тинсет заявил, что этот вариант оптимизирован для рынка АТР. Первоначально планировалось, что удлиненный вариант выйдет на трассы в 2010 г., но сроки были сдвинуты до 2014 г., а в 2010 г. была утверждена только общая компоновка.

Боинг 787-9 призван составить конкуренцию самолету Эрбас А330 и заменить самолеты Боинг 767-400ER. Стартовым заказчиком стала авиакомпания «Эйр Нью-Зиланд» из Новой Зеландии.

Изготовление агрегатов первого опытного самолета (ZV001) началось в конце 2011 г. Удлиненные на 3,05 м секции фюзеляжа № 46 и 43 поставили, соответственно, корпорация «Аления» и концерн «Кавасаки». При изготовле-



Экспериментальный образец системы HLFC

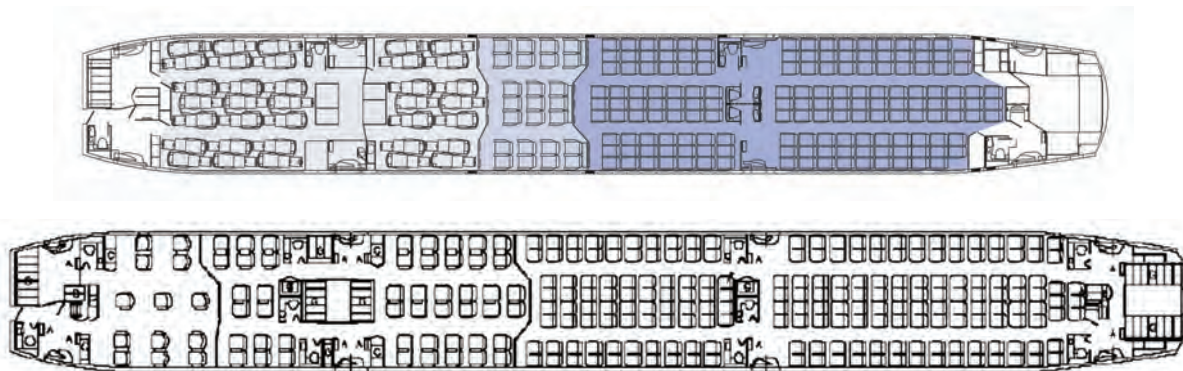


Сборка первого опытного самолета Боинг 787-9

нии новых секций возникла проблема их стыковки — по первоначальному замыслу шов проходил через один из иллюминаторов. Однако опытная сборка фюзеляжа не позволила обеспечить качественное крепление секций в районе выреза иллюминатора, поэтому было решено просто отказаться от него.



Первый взлет первого опытного самолета Боинг 787-9



Компоновки салонов самолетов Боинг 787-8 на 214 мест (вверху) и 787-9 на 259 мест (внизу)

Одновременно решалась задача достижения целевых значений полезной нагрузки и массы планера посредством внесения изменений в конструкцию второго самолета Боинг 787-9. Производственная линия по выпуску самолетов будет включать в себя новое оборудование для перемещения двух дополнительных секций фюзеляжа.

С целью снижения аэродинамического сопротивления в конструкции будет использоваться технология управления ламинаризацией воздушного потока (HLFC). Поверхности управле-

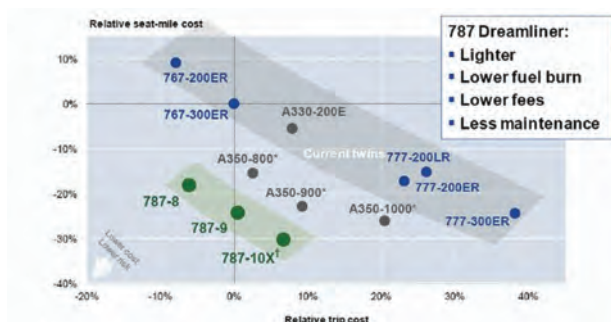
ния системы HLFC прошли испытания на летающей лаборатории ZA003.

Выкатка первого опытного самолета из сборочного цеха состоялась ночью 27 июля 2013 г. без какой-либо помпы, а первый полет состоялся 17 сентября 2013 г. Самолет должен быть поставлен новозеландской авиакомпания в середине 2014 г.

787-10. «Дополнительно удлиненная» до 68 м модификация, предназначенная для маршрутов протяженностью до 12 950 км. Это позволит ей эксплуатироваться на 90% авиалиний, на которых сейчас летают самолеты Боинг 777-200, Эрбас А330 и А340. За счет сокращения дальности полета число кресел в салоне увеличено до 330 при трехклассной компоновке.

Первый заказ на 30 самолетов Боинг 787-10 30 мая 2013 г. разместила авиакомпания «Сингапурские авиалинии». Первый полет намечен на 2017 г., начало поставок — на 2018—2019 гг.

Запуск в июне 2013 г. программы самолета Боинг 787-10, а также работы по новым модификациям двигателей самолета привели к новому



Рост эффективности модификаций



Внешний облик самолета Боинг 787-10

раунду конкурентной борьбы среди двигателестроителей, масштабы которой еще недавно невозможно было предвидеть. ТРДД GE9x-1B и «Трент» 1000 сыграли заметную роль в создании самолета Боинг 787. Рост массы планера заставил в свое время компанию «Боинг» поднять требования к тяге двигателя (с 30.5 до 31.8 т). В настоящее время потребная тяга для самолета Боинг 787-10 достигает уже 35.4 т.

Корпорация «Дженерал Электрик» планирует захватить лидерство, введя на своих двигателях второй пакет повышения характеристик (PIP-2). Она утверждает, что с введением нового пакета (это уже третий этап доработок двигателя после четвертой серии на опытных самолетах и первого пакета PIP-1 на первых серийных самолетах) удастся достичь всех требуемых компанией «Боинг» характеристик по тяге и экономичности. Для сравнения, компания «Роллс-Ройс» планирует получить схожие характеристики только на двигателе «Трент» 1000-TEN, запуск которого в производство возможен не ранее 2016 г.

Двигатель в варианте PIP-2 будет иметь серьезные конструктивные отличия. Так, вариант PIP-1 отличался от первых ТРДД GE9x улучшенной на 1% экономичностью, для чего модифицировали турбину низкого давления (уменьшили число лопаток, снизили массу узлов). Вариант PIP-2 обеспечит улучшение экономичности еще на 1%, но доработки более серьезные. В частности, будет слегка увеличен диаметр вентилятора, причем без изменения обводов мотогондолы.

Компания «Роллс-Ройс» также ведет доработку своего ТРДД «Трент» 1000. Так, вариант двигателя «пакет А», установленный на самолетах авиакомпании ANA два года назад, сменился на «пакет В». На варианте 787-9 уже установлены двигатели «пакета С», имеющие на 1% лучшую экономичность и тягу до 33.6 т. Но чтобы догнать по характеристикам ТРДД GE9x-1B (PIP-2), потребуется еще одна модернизация.

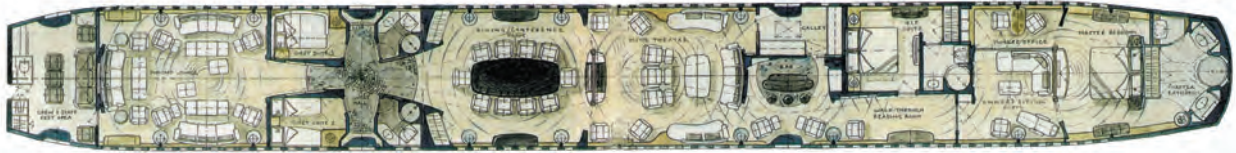
Двигатель «Трент» 1000-TEN представляет собой новый этап развития и является результатом программы «Трент» XWB. Конструктивно новый двигатель сохранит трехвальную схему предшественника и общую компоновку. Останутся и кованые титановые лопасти вентилятора с широким саблевидным профилем. Главным отличием станут новые технические решения для промежуточного компрессора, турбины и компрессора высокого давления. Для поднятия тяги сечение промежуточного компрессора будет

увеличено, а компрессор высокого давления, так называемый «новый аэродинамический компрессор» (NEWAC), будет выполнен с учетом исследований по программе «Трент» XWB. Первые три ступени компрессора высокого давления, обычно состоящие из диска и укрепленных на нем лопаток, теперь будут выполнены в виде единой детали, так называемого «блиска». И, наконец, новая одноступенчатая турбина высокого давления получит более эффективную систему охлаждения, также разработанную по программе «Трент» XWB. В целом архитектура «горячей части» двигателя будет изменена, чтобы обеспечить необходимое «модулирование газового потока» между компрессором высокого давления и турбиной. Горячая часть двигателя уже прошла 1000-часовые испытания на предприятии компании «Роллс-Ройс» в Дерби. Испытания двигателя-демонстратора планировалось начать на рубеже 2013—2014 гг. В первую очередь он предназначен для подтверждения заявленных характеристик.

Стоимость базового варианта (787-8) оценивается в 161—171.5 млн долл. (в 2012 г. подписан контракт с авиакомпанией «Катар» на 30 самолетов стоимостью 185.2 млн долл. каждый). Самолет Боинг 787-3 мог бы стоить несколько меньше — 150—155.5 млн долл., а вариант Боинг 787-9 дороже — 194—205.5 млн долл. Хотя компания «Боинг» не раскрывает информацию о стоимости программы НИОКР и выпуска самолетов, аналитики оценивают полную стоимость данной программы в 40—50 млрд долл. Они также полагают, что точка самоокупаемости программы Боинг 787 будет достигнута после продажи 1200—1900 самолетов. Руководство компании «Боинг» считает, что программа выпуска самолетов Боинг 787 достигнет самоокупаемости к 2020 г.

«Эко-Демонстратор». Опытный самолет Боинг 787-8 для отработки новых технологий керамических композиционных материалов и новых принципов организации воздушного движения. В самолет-демонстратор планировалось переоборудовать один из опытных самолетов Боинг 787-8: ZA005 или ZA006. О начале работ было объявлено в 2012 г. на выставке в Фарнборо.

VIP вариант. 25 ноября 2013 г. компания «Боинг» выкатила из цеха окончательной сборки в Сиэтле первый самолет Боинг 787 в VIP конфигурации (бортовой номер A6-PFC), предназначенный для компании «Абу Даби Эмири Флайт», осуществляющей перевозку первых лиц ОАЭ.



Один из вариантов компоновки VIP салона, представленный в 2007 г. на выставке в Дубае



Вариант интерьера салона

Самолет передали заказчику в декабре. В конце января 2014 г. самолет с бортовым номером N28MS получил американский клиент, который приобрел это ВС через компанию «Скай Блю Холдинг» (эксплуатировать самолет будет авиакомпания «Джет Авиэйшн»), а самолет с бортовым номером HZ-MF7 — Министерство финансов Саудовской Аравии. Все ВС поставлены «в зеленой конфигурации». К концу 2013 г. лишь три компании получили соответствующие сертификаты на выполнение работ по установке интерьеров и дополнительного оборудования на самолеты Боинг 787: «Джет Авиэйшн Базель», «Коре Дизайн Комплешинс» и «Гринпойнт Технолоджис». В ходе выставки NBAA-2013 компания «Коре Дизайн Комплешинс» сообщила о заключении контрактов на комплектацию двух самолетов Боинг 787 в VIP конфигурацию. Самолеты будут эксплуатироваться главами государств, оба будут оборудованы в центре комплектации в Сан-Антонио.

Продажи самолета Боинг 787 VIP начались еще в 2006 г., и спрос на этот вариант оказался достаточно высоким (15 ВС за два года), несмотря на то что первый самолет заказчики могли получить не ранее 2016 г. Предполагалось, что компания «Боинг» будет выпускать не более двух таких самолетов в год. Первую концепцию оформления салона представили на выставке бизнес-авиации в Дубае в феврале 2007 г. Заказчиками были только частные лица из стран Ближнего Востока, Европы и Азии, в том числе по одному заказчику из России и Гонконга. В 2012 г. президент отделения «Боинг Бизнес Джетс» Стив Тейлор сообщил, что уже подготовлены технические данные VIP варианта и в течение года ожидается реакция потенциальных заказчиков для начала работы над дизайном интерьера и внесения необходимых дополнений в конструкцию. Он также отметил, что слоты на поставку новых самолетов в бизнес-компоновке будут открыты не ранее 2019 г. Пока же компания «Боинг» предлагает три ВС из числа опытных самолетов, которые могут быть переделаны в бизнес-версию в самые короткие сроки. Они будут доступны для рынка в 2014 г. К февралю 2014 г. имелось 13 заказов на ВС Боинг 787-8 VIP, поставки «расписаны» до 2018 г. Длина салона 48,4 м, ширина 5,74 м, высота 2,3 м, объем багажного отсека 174,4 м³. Цена самолета будет превышать 230 млн долл.

Грузовой вариант. Уже на этапе НИОКР компания «Боинг» предусматривала возможность быстрой конвертации пассажирского само-



Первый самолет Боинг 787 в VIP конфигурации



Облик грузового варианта самолета Боинг 787



Так мог бы выглядеть «Борт № 1» на базе самолета Боинг 787

лета в грузовой. Все системы (в том числе электрические и гидравлические линии) были размещены таким образом, чтобы оставить свободным место для выреза под грузовой люк.

Однако прогноз состояния рынка на 20 лет, выполненный компанией «Боинг», показал, что сегмент рынка грузовых моделей Боинг 787 будет со временем сокращаться. В 2009 г. грузовые самолеты грузоподъемностью 40—80 т занимали 36% рынка, а в 2029 г. такие самолеты будут занимать только 27% рынка грузовых самолетов. Работы по этому варианту пришлось отложить на неопределенное время.

Другие варианты. Самолет Боинг 787 также фигурировал в перспективной концепции ВВС

США в качестве кандидата на выполнение самых различных задач, начиная от самолета ДРЛО и заканчивая заменой президентского самолета VC-25A, созданного на базе ВС Боинг 747-200. Еще в 2008 г. командование ВВС США обратилось к компании «Боинг» с просьбой предоставить оценки технических характеристик и стоимости применения ВС Боинг 787 в качестве замены для самолета VC-25A. Однако администрация президента Б. Обамы отменила исследования по программе замены самолетов VC-25A, несмотря на то что в настоящее время они относятся к числу наиболее дорогих в эксплуатации самолетов ВВС.

Основные характеристики самолетов Боинг 787 (по данным IHS Jane's All the World's Aircraft 2013—2014)

	787-3	787-8	787-9	787-10	787-9VIP
Число пассажиров	290—330	210—250	250—290	300—330	28—50
Размах крыла, м	51.6	60.12	63.36	63.35	63.35
Длина самолета, м	55.5	56.72	62.81	68.9	62.81
Высота самолета, м	16.5	16.89	16.97	16.5	16.97
Высота фюзеляжа, м	5.77	5.77	5.77	5.77	5.77
Масса пустого самолета, кг	Н. д.	108 860	115 345	Н. д.	127 820
Максимальная масса без топлива, кг	Н. д.	156 485	179 620	Н. д.	Н. д.
Максимальная взлетная масса, кг	Н. д.	219 540	244 940	Н. д.	Н. д.
Максимальная масса топлива, кг	Н. д.	101 115	101 115	Н. д.	126 917
Максимальное число М	903	903	903	903	902
Крейсерское число М	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Дальность полета, км:					
с 210 пассажирами	—	15 742	Н. д.	—	18 983*
с 250 пассажирами	Н. д.	14 816	16 297	—	—
с 290 пассажирами	Н. д.	—	15 927	Н. д.	—
Максимальная высота полета, м	13 000	13 135	13 135	13 135	13 106

* С 8 пассажирами.

B. Domketi. Boeing 787 Lessons Learnt. 2008.
 M. Jenks. Development 787 Program. International council of the aeronautical sciences, 2008.
 G. Norris, M. Wagner. Boeing 787 «Dreamliner». Zenith Press, 2009.

Air International, 2008—2013 гг.
 Aviation Week & Space Technology, 2009—2013 гг.
 Flight International, 2009—2013 гг.
 Интернет сайты: boeing.com, flightglobal.com.
 Рекламные материалы компании «Боинг».

«ТИ», ЦАГИ, 2014, выпуск 1—2, 1—80

Редакционная коллегия: **В. П. Соколянский, А. А. Юргенсон,**
И. В. Кудишин, В. А. Бакурский,
Л. Н. Родионова (секретарь, литературный редактор)

Обложка **М. В. Муратов**
Корректор **Т. Н. Рыжикова**

Сдано в набор 31.11.2013.
Гарнитура тип Таймс.
Бум. л. 5.25.

Подписано в печать 10.04.2014.
Офсетная печать.
Усл. печ. л. 10.25.

Формат бумаги 60 × 90^{1/8}.
Офсетная № 1.
Уч-изд. л. 10.74.

Издательский отдел ЦАГИ. Зак. 5692

