

T-c-c! Рассказ о том, как одна компания смогла уменьшить шум от самолётов при помощи цифрового двойника

Parthiv N. Shah (компания ATA Engineering), Prashanth S. Shankara (компания Siemens PLM Software)

Введение

Самолеты – одно из величайших изобретений человечества. У большинства людей они вызывают чувство восхищения... но только если вы не живете слишком близко к крупному аэропорту. В этом случае вы, скорее всего, будете ощущать беспокойство и раздражение. Постоянный шум от самолетов приводит к бессонным ночам, стрессу, вызывает проблемы со здоровьем и снижает качество жизни.

Аэропорты, авиалинии и авиационные администрации во всём мире уже давно пытаются бороться с шумовым загрязнением в окрестностях воздушных гаваней. В обозримом будущем ни аэропорты, ни окружающие их дома перенести куда-то невозможно, поэтому необходимо срочно принимать какие-то меры. Консультативный совет по европейским авиационным исследованиям (ACARE) подготовил документ “Траектория 2050” – европейскую программу развития авиации, в которой поставлена цель к 2050 году снизить уровень шума в аэропортах на 65 процентов. Среди стратегий снижения шума – ограничения на полеты, звукоизоляция домов, закрытие аэропортов в ночное время... Но радикальное решение требует устранения коренной причины проблемы: необходимо снизить уровень шума, производимого самими воздушными судами.

Основным источником шума в аэропортах являются авиадвигатели, работающие на взлетном режиме. При снижении и заходе на посадку тяга двигателей уменьшается, поэтому создается в основном аэродинамический шум, возникающий на управляющих поверхностях, шасси, закрылках и воздушных тормозах. Большинство этих элементов конструкции создают дополнительное сопротивление, необходимое для поддержания требуемой траектории самолета, но они же при этом становятся и источниками избыточного шума. Один из способов его устранения – применение “тихих” тормозных устройств, снижающих шум при посадке за счет более крутой глиссады, меньшей посадочной скорости и создающей меньше шума траектории захода.

Компания *ATA Engineering* в сотрудничестве с Исследовательским центром им. Дж. Гленна (НАСА), компанией *Williams International* и Массачусетским технологическим институтом (MIT) разработала новую концепцию **двигательных воздушных тормозов (ДВТ)**, позволяющую снизить уровень шума.



ДВТ – это изобретенный в MIT уникальный аэродинамический тормоз. Он представляет собой комплект поворотных лопаток. Лопатки создают закрученный поток истекающих из двигателя газов. Получив финансирование в рамках программы НАСА “Поддержка инновационных исследований в малом бизнесе” (SBIR), компания *ATA Engineering* довела эту идею до практического воплощения в виде выдвижного выпускного конуса с лопатками-завихрителями. Системы *STAR-CCM+* и *NX*, входящие в разработанное компанией *Siemens PLM Software* семейство **Simcenter**, сыграли важнейшую роль в проектировании ДВТ. Их применение значительно ускорило разработку этого агрегата, позволив создать и испытать цифровой двойник задолго до изготовления опытного образца.

По шкале уровня готовности технологий (TRL), применяемой в НАСА, компания *ATA* уже довела концепцию ДВТ до шестого уровня: “наличие полнофункционального опытного образца”. Шкала TRL включает уровни с 1 по 9. Первый уровень соответствует разработке базовых принципов и эскизного проекта, а девятый означает наличие успешно прошедшей летные испытания системы.

Что же такое ДВТ?

Применяемая компанией *ATA* концепция двигательного воздушного тормоза была предложена Шахом с соавторами в работах [1–3] в качестве дальнейшего развития проекта MIT. Выполнен ДВТ в виде выдвижного устройства, изменяющего сопротивление воздушного судна. Сопротивление давления образуется путем создания завихрений на выходе из двигателя, что приводит к снижению тяги. В полете ДВТ находится в убранном положении. При заходе на посадку механизм лопаток завихрителя



Рис. 1. Установка ДВТ на двигатель FJ44-4

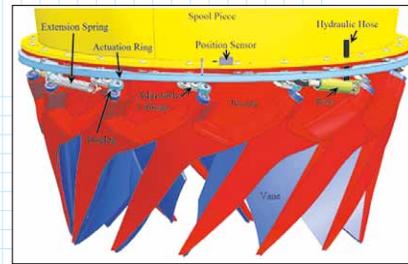


Рис. 2. Основные узлы ДВТ, смоделированные в NX

выдвигается (рис. 1), образуя закрученный поток на выходе из реактивного двигателя. Закрученный поток воздуха создает дополнительное сопротивление, снижая тягу двигателя. Поток поддерживается наличием радиального градиента давления, образуемого лопатками завихрителя. Система обеспечивает снижение и заход на посадку на более низкой скорости, по более крутой глиссаде и с меньшим уровнем шума, в тех ситуациях, когда тягу нельзя снизить.

Наземный демонстратор ДВТ состоит из отрезка трубы, алюминиевого сопла, двенадцати термостойких алюминиевых лопаток, валов из нержавеющей стали и шарнирно-рычажных механизмов, трех гидроцилиндров и пружин, приводного кольца из нержавеющей стали и струнного потенциометра (рис. 2). Сейчас компания *ATA Engineering* в партнерстве с компанией *Williams International* работает над тем, чтобы продемонстрировать функционирование ДВТ на двухкаскадном двигателе *FJ44-4* средней степени двухконтурности с тягой 1800 кг.

Сложные требования к конструкции

При проектировании любого изделия вносимые изменения неизбежно приводят к нежелательным последствиям, причем, особенно ярко это проявляется именно в авиационно-космической отрасли. В рамках программы *TRL* сначала были выявлены цели проекта и требования к проектированию ДВТ. К целям относились:

- 1) проектирование, изготовление и испытание ДВТ с приемлемым летным весом, предназначенного для установки на современный турбовентиляторный реактивный двигатель;
- 2) расчет эквивалентного воздушного сопротивления, оценка влияния на эксплуатационные качества, уровень шума, расходы и вес воздушного судна;
- 3) выполнение расчетов на уровне систем для оценки предлагаемой схемы захода по более крутой глиссаде с целью снижения уровня шума.

Кроме того, были определены следующие требования к аэродинамическим характеристикам ДВТ:

- отсутствие существенного роста удельного расхода топлива по тяге в убранном положении ДВТ;
- снижение суммарной тяги на 15% при выпущенном ДВТ и оборотах двигателя, соответствующих режиму “неточного захода”. Изменение тяги выражается в процентах от тяги при убранном ДВТ в том же режиме полета;
- отсутствие существенного роста расхода топлива или снижения потока газа в двигателе при полностью выпущенном ДВТ;
- обеспечение достаточного противопомпажного запаса во всех режимах, включая переходные режимы выпуска и уборки ДВТ;
- соблюдение требований по длительности выпуска и уборки ДВТ (0.5 и 3÷5 секунд соответственно).

Среди прочих требований были заданы ограничения по прочности и компоновке, гарантировавшие возможность установки ДВТ на самолет типовой конструкции (например, *Cessna CJ4*) без ухудшения летных характеристик, но с обеспечением снижения уровня шума. В ходе проектирования выполнялась оценка характеристик различных систем. Рассматривались аэродинамические, механические, акустические и прочностные свойства.

Проектирование аэродинамики в системе STAR-CCM+

Трехмерная параметрическая твердотельная геометрия деталей и узлов ДВТ создавалась в системе *NX* компании *Siemens PLM Software*. Возможности этой системы позволили быстро

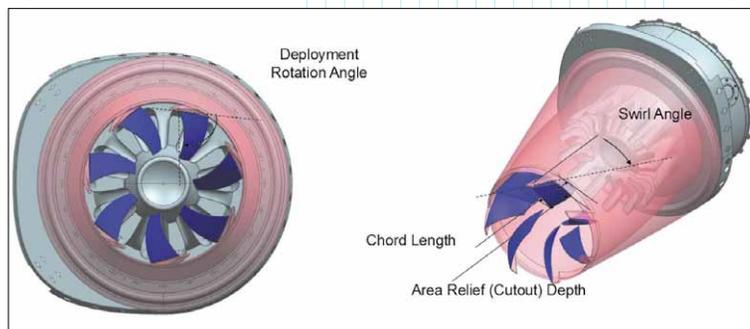


Рис. 3. Параметры конструкции, исследовавшиеся в системе STAR-CCM+

предлагать варианты конструкции с различными аэродинамическими параметрами. К учитываемым при расчете параметрам конструкции (рис. 3) относились: число лопаток N , угол их установки S , угол поворота воздушного тормоза в выпущенном состоянии R , длина хорды L и глубина выреза C .

Одним из важнейших аспектов совершенствования технологии ДВТ стало проектирование на основе численного моделирования (*Analysis-Driven Design*) в системе *STAR-CCM+*. В результате были получены количественные характеристики потока и эксплуатационные параметры, а также оценены тепловые режимы. Используя мощные средства вычислительной гидрогазодинамики, оптимизации конструкций, а также высокопроизводительную вычислительную технику, компания *ATA* смогла провести полный аэродинамический расчет и разработать окончательный вариант конструкции, отвечающий всем аэродинамическим требованиям, определенным при помощи численного моделирования. На рис. 4 показано проведение аэродинамических расчетов.

Сеточная модель строилась на основе полиэдральных ячеек. Для учета пристеночных эффектов использовались призматические слои. Окончательная сеточная модель содержала от 3 до 5 млн. конечных элементов. В качестве граничных условий задавались полное давление и температура на входах в вентилятор, ядро потока и область невозмущенного течения. Рассматривалась модель идеального газа на основе решения осредненных по Рейнольдсу

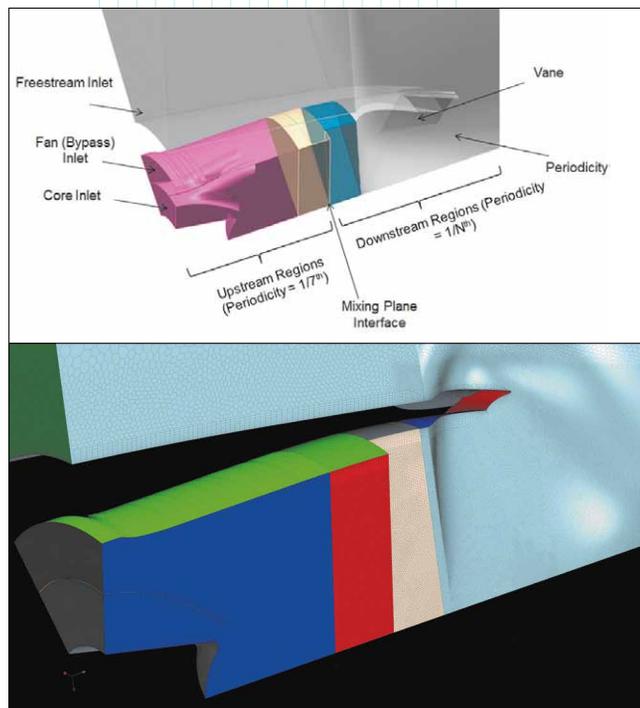


Рис. 4. Расчетная область и сеточная модель в системе *STAR-CCM+*

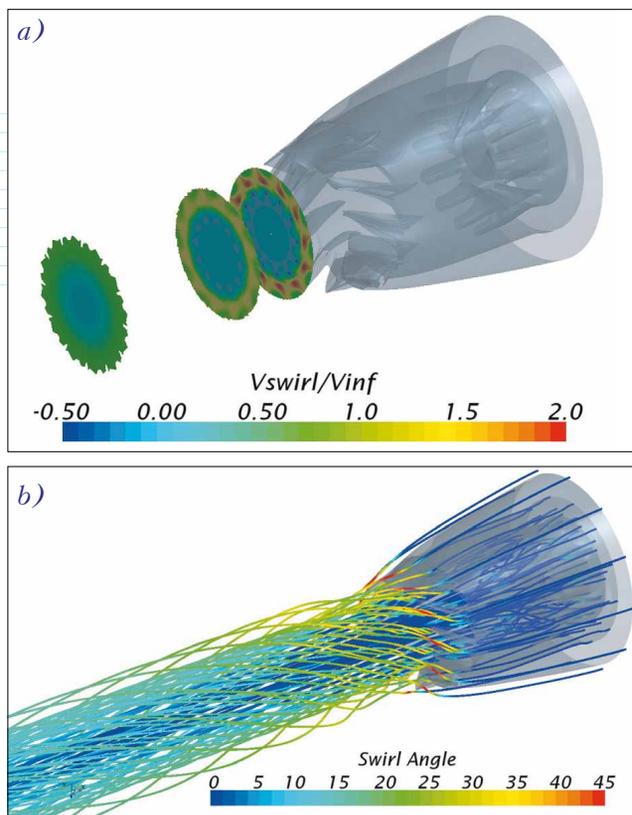


Рис. 5. Результаты расчета для окончательного варианта геометрии с ДВТ в выпущенном состоянии:

- a) отношение скорости вращения потока к скорости невозмущенного потока в плоскостях, расположенных на выходе из двигателя;
- b) линии тока, раскрашенные в соответствии со степенью закручивания потока

уравнений Навье-Стокса. В качестве модели турбулентности применялась *k- ω SST*. При расчете были учтены геометрические особенности модели, что позволило рассматривать 1/7 модели с заданием условий периодичности. Для учета неоднородности потока, истекающего из 14-лопаточного сопла, применялся интерфейс смешения. Уменьшение расчетной области позволило значительно сократить объем вычислений и ускорить исследование пространства проектных решений. Окончательные варианты конструкции рассчитывались по всей окружности с целью проверки достижения предсказанных характеристик.

На рис. 5 показаны поля безразмерной скорости вращения потока (нормализованной относительно скорости полета), а также линии тока около ДВТ в убранном и выпущенном положениях. Исходя из скорости вращения потока, можно увидеть, что поток становится осесимметричным на расстоянии примерно в два диаметра сопла от лопаток. На основании расчетов аэродинамических характеристик в

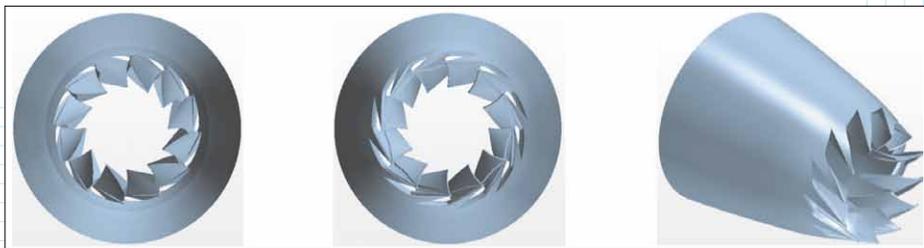


Рис. 6. Окончательный вариант конструкции, выбранный из 150-ти рассмотренных при помощи системы STAR-CCM+ вариантов

системе STAR-CCM+ вносились изменения в параметры создаваемой в системе NX конструкции. Всего было рассмотрено 150 различных вариантов. В итоге был выявлен наилучший из них – его параметры представлены на рис. 6.

Проектирование на основе расчетов, поддерживаемое решениями от Siemens PLM Software

Помимо описанных выше аэродинамических расчетов, компания ATA Engineering применяла разработанные в Siemens PLM Software

системы на всех этапах процесса проектирования, проводимого на основе расчетов, в результате чего и был получен окончательный вариант конструкции. Возможности мультифизических расчетов в STAR-CCM+ позволили выполнить анализ газодинамических характеристик и расчет перетекания газа через зазоры с применением осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса на основе RANS-моделей, провести расчеты сопряженного теплообмена, на основе моделей крупных вихрей (LES) определить изменяющиеся во времени нагрузки и проанализировать возможность возникновения флаттера. В результате этой работы был создан цифровой двойник ДВТ. С его помощью выполнялась оценка аэродинамических характеристик окончательного варианта конструкции.

Для прочностных расчетов методом конечных элементов, оценки усталостной прочности, тепловых и конструктивных деформаций применялось решение NX Nastran от Siemens PLM Software. На рис. 7 показаны примеры численного моделирования, на основе результатов которых был создан полноценный цифровой двойник. Проектирование механизма раскрытия воздушного тормоза оказалось непростой задачей из-за ограниченности места и сложности обеспечения синхронного перемещения всех 12 лопаток. Твердотельное моделирование в NX и наложение ограничений на уровне сборки позволило визуализировать процесс раскрытия и проверить отсутствие столкновений между деталями.

Изготовление натурального опытного образца ДВТ проводилось на 5-осевом фрезерном станке, и затем он дорабатывался вручную.

Совершенствование технологии до уровня TRL 6 с помощью наземных испытаний

Полномасштабные наземные испытания окончательного варианта конструкции ДВТ проводились на испытательном полигоне № 2 (ИП-2) компании Williams International в Уоллед Лейк, шт. Мичиган. Эти испытания успешно подтвердили, что опытный образец ДВТ соответствует заданным техническим характеристикам.

Результаты испытаний:

- достигнуты целевые значения сопротивления потока, параметров течения и эксплуатационных характеристик;

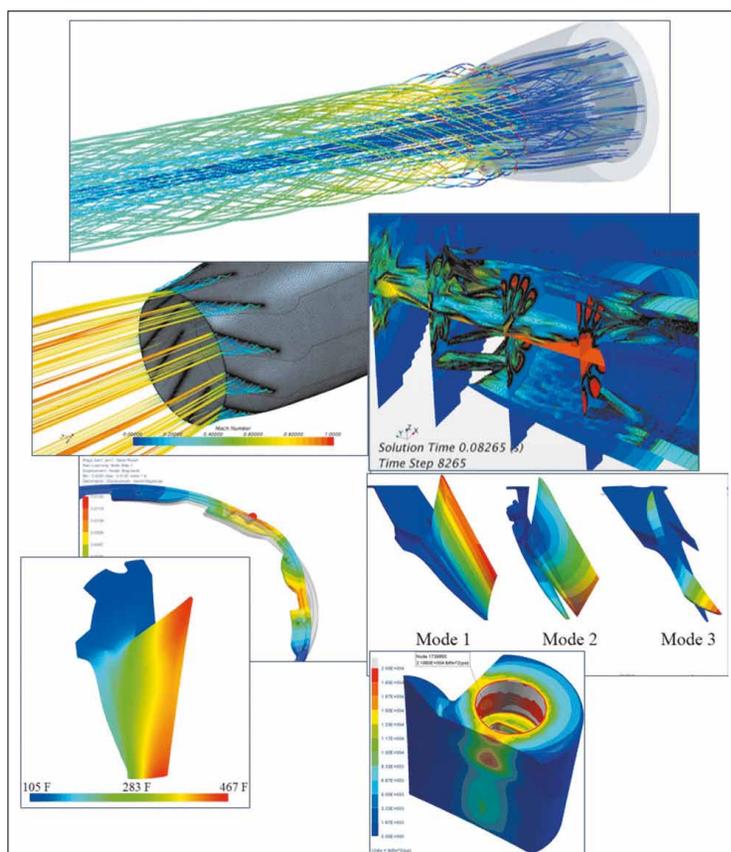


Рис. 7. Результаты расчетов в различных системах, разработанных компанией Siemens PLM Software. На основе этих расчетов создавался цифровой двойник ДВТ

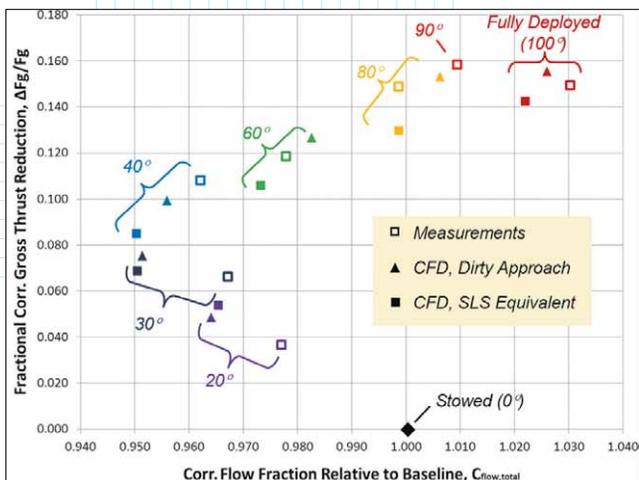


Рис. 8. Сравнение величины снижения тяги, полученной расчетами при помощи цифрового двойника (в STAR-CCM+), и измеренной на практике при наземных испытаниях

- уровень шума точно соответствует расчетному;
- продемонстрированы выпуск ДВТ (менее чем за 5 с) и его уборка (за 0.5 с);
- зафиксировано сокращение расхода топлива на выпуск воздушного тормоза;
- механизм уместился в заложенные габариты;
- тепловые характеристики соответствуют прогнозу, проблем с динамической прочностью также не наблюдалось;



Рис. 9. Место проживания автора статьи способствует дальнейшему совершенствованию описываемой технологии – обратите внимание на взлетную полосу в середине снимка

• расчетами показано, что более крутой угол глиссады имеет большой потенциал в плане снижения уровня шума.

Испытания подтвердили расчетные зависимости характеристик ДВТ от угла поворота лопаток, определенные на основе цифрового двойника изделия. На рис. 8 представлены безразмерный расход потока по оси X и создаваемые потери по оси Y – в убранном положении и на различных стадиях выпуска воздушного тормоза. Результаты расчетов в системе STAR-CCM+ показали отличное согласование с результатами натурных испытаний. Это еще более упрочило репутацию системы STAR-CCM+ как надежного и эффективного средства численного моделирования, помогающего в создании новых технологий. Расчеты захода на посадку по более крутой траектории показали, что уровень шума на поверхности земли снижается на величину от 1 до 3 dB, что подтверждает эффективность ДВТ как средства снижения шума.

Авиацию ждет бесшумное будущее

После достижения первоначального успеха следующим шагом должны стать наземные испытания надежности и долговечности системы, а затем – летные испытания. Компания ATA Engineering надеется, что самолеты будущего будут оснащены ДВТ, и что устройство вскоре начнет устанавливаться на существующие воздушные суда. Не исключено, что уже в недалеком будущем люди будут выстраиваться в очередь на покупку домов вблизи аэропортов. Звучит дико?

Вовсе нет. Самолеты и аэропорты станут более тихими, а что может сравниться с потрясающим видом с балкона, когда целый день можно наблюдать за взлетами и посадками чудесных летающих машин! 😊

Литература

1. Shah, P.N., et al. Engine Air-Brakes for Quiet Air Transport. *AIAA-2007-1033, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno, NV, January, 8–11, 2007.
2. Shah, P.N., et al. A Novel Turbomachinery Air-Brake Concept for Quiet Aircraft. *Journal of Turbomachinery*, vol. 132, October, 2010.
3. Shah, P.N. et al. Aeroacoustics of Drag Generating Swirling Exhaust Flows. *AIAA Journal*, vol. 48, no. 4, April, 2010, pp. 719–737.