

VIII Российская конференция
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
В АЭРОАКУСТИКЕ И АЭРОДИНАМИКЕ



20—25 сентября 2021 г., ГЕЛЕНДЖИК



Аэродинамическое проектирование осесимметричного сопла двухконтурного двигателя под параметры сверхзвукового гражданского самолёта

А.А. Савельев, А.В. Шенкин

Отделение аэродинамики силовых установок



1. Введение
2. Методика аэродинамического проектирования
3. Однокритериальная оптимизация
4. Многокритериальная оптимизация
5. Заключение

Введение

СПС первого поколения

- В 60-х годах 20-го века в СССР и Европе были созданы первые сверхзвуковые пассажирские самолёты (СПС) Ту-144 и Конкорд. Для обеспечения требуемых лётно-технических характеристик (дальний сверхзвуковой полёт) требовались достаточно мощные **двигатели с изменяемой геометрией сопла**.
- СПС первого поколения были оснащены **одноконтурными неэкономичными двигателями**, что стало основной причиной их малорентабельности.
- Применение одноконтурных двигателей не позволяло рассчитывать на **приемлемый уровень шума** на местности на взлётно-посадочных режимах.



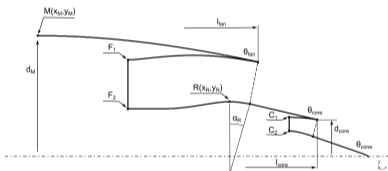
Сопло Ту-144



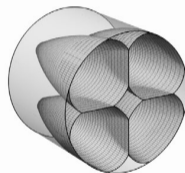
Сопло Конкорда

Современное состояние проблемы

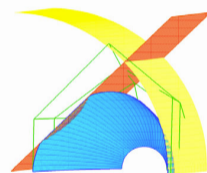
- Обеспечить минимальный уровень потерь тяги сопла можно с помощью **оптимизации его формы**. Как правило, геометрия сопла оптимизируется на один крейсерский режим полёта.
- Например, в работе [1] приводится описание методики проектирования сопел **двигателей большой степени двухконтурности с разделённым истечением потоков**, применяемых в дозвуковой авиации.
- В работе [2] решается задача построения **сверхзвуковой части** осесимметричного сопла, а в работе [3] — **пространственного сопла** воздушно-реактивного двигателя.



Сопло ТРДД с разделённым истечением потоков
(источник: [1])



Сверхзвуковая часть пространственного сопла
(источник: [3])



¹Зленко Н.А., Михайлов С.В., Савельев А.А., Шенкин А.В. Методология оптимального проектирования двухконтурных сопел в составе мотогондолы двигателя // Труды ЦАГИ. 2013. № 2710

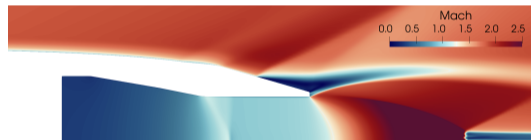
²Таковицкий С.А. Оптимальные сверхзвуковые сопла, имеющие степенную образующую // МЖГ. 2009

³Исакова Н.П., Крайко А.А., Пьянков К.С. Прямой метод профилирования оптимальных пространственных аэродинамических форм // ЖВМ и МФ. 2012

- Сопло двигателя СГС должно эффективно работать, как на **сверхзвуковом** ($M=1.8$), так и на **трансзвуковом** ($M=0.9$) режимах полёта.
- Геометрия сопла должна изменяться, обеспечивая требуемые характеристики в **широком диапазоне** величин степени понижения давления в сопле.
- Таким образом, сопло должно быть **многорезжимным**, и значит оптимизационная задача по его проектированию должна рассматриваться в **многокритериальной постановке**.



Трансзвуковой режим, $M = 0.9$, $dP_{с\ эфф} = 0.092$



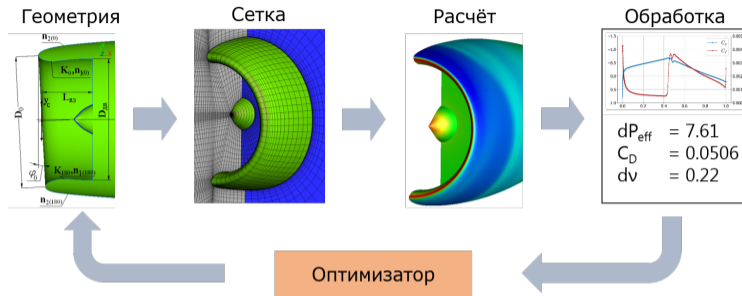
Сверхзвуковой режим, $M = 1.8$, $dP_{с\ эфф} = 0.122$

Рассматривается задача аэродинамического проектирования хвостовой части изолированной осесимметричной гондолы **ТРДД** с $m \approx 3$.

Цель работы: определение **минимально достижимого уровня потерь эффективной тяги** в диапазоне режимов полёта СГС, который может быть использован на дальнейших этапах работ в качестве **базы для сравнения и оценки эффективности** различных технических решений.

Методика аэродинамического проектирования

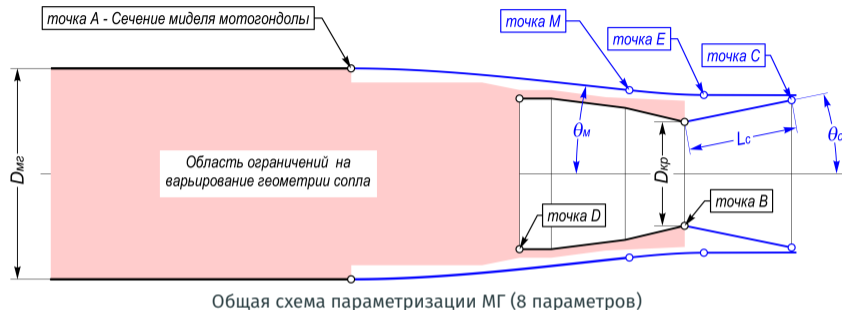
Оптимизационный цикл



- Автоматизированная процедура аэродинамического расчёта
- Параметризация геометрии в САПР
- Программа аэродинамического расчёта ZEUS (комплекс EWT-ЦАГИ)
- Алгоритм оптимизации, основанный на построении суррогатных моделей
- Учёт конструктивных и аэродинамических ограничений

⁴Зленко Н. А., Михайлов С. В., Савельев А. А., Шенкин А. В. Методика оптимального аэродинамического проектирования мотогондолы ТРДД с большой степенью двухконтурности // Учёные записки ЦАГИ. 2015

Параметрическая модель



- Фиксированы
 - диаметр миделя мотогондолы
 - форма дозвуковой части сопла (включая D)
- Варьируются 8 параметров
 - форма внешней поверхности сопла (6 параметров)
 - длина и угол раскрытия сверхзвуковых створок сопла (2 параметра)
- Розовым цветом закрашена область ограничений на варьирование геометрии, в которой могут располагаться штатные элементы конструкции и агрегаты двигателя

- Расчётный модуль **ZEUS**⁵, пакет прикладных программ **EWT-ЦАГИ**⁶
- Уравнения RANS, модели турбуленности **S-A**, SST и γ SST
- Многоблочная структурированная расчётная сетка
- Метод конечного объёма, схема MUSCL (2 порядок)
- Неявный шаг по времени

Целевая функция: коэффициент потерь эффективной тяги сопла

$$dP_{C \text{ эфф}} = 1 - \frac{P_{C \text{ эфф}}}{P_{C \text{ ид}}}, \quad P_{C \text{ эфф}} = P_C + F_{\text{внеш}}$$

⁵Михайлов С. В. Объектно-ориентированный подход к созданию эффективных программ, реализующих параллельные алгоритмы расчёта // Труды ЦАГИ, Труды ЦАГИ. 2007. № 2671

⁶Босняков С. М. Концепция программного продукта EWT-ЦАГИ и основные этапы её развития // Труды ЦАГИ. 2007. № 2671

Алгоритм оптимизации:

алгоритм Эффективной глобальной оптимизации (EGO⁷), использующий в качестве суррогатной модели регрессию на гауссовских процессах

Программная реализация:

программа с открытым исходным кодом Dakota⁸ (Sandia Lab.)

Алгоритм состоит из следующих этапов:

1. Генерация обучающей выборки N_{DOE}
2. Построение суррогатной модели (гауссовские процессы)
3. Нахождение максимума функции ожидаемого улучшения
4. Завершение или добавление точки к выборке и переход к этапу 2

⁷Jones D.R., Schonlau M., Welch W.J. Efficient Global Optimization of Expensive Black-Box Functions // J. Glob. Optim. 1998. V. 13

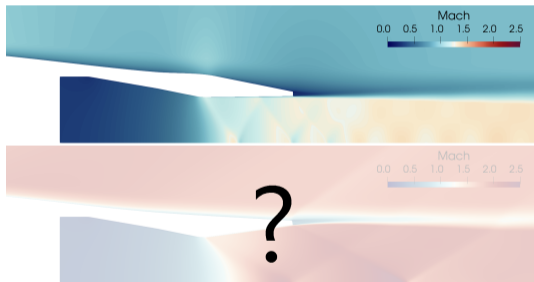
⁸<http://dakota.sandia.gov>

Однокритериальная оптимизация

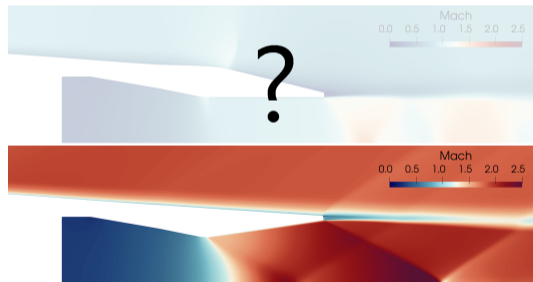
Однокритериальные оптимумы

Рассматриваются две **однокритериальные** задачи:

- оптимизация на трансзвуковом режиме полёта $M = 0.9$, $\pi_c = 2.9$ (**трансзвуковой оптимум**)
- оптимизация на сверхзвуковом режиме полёта $M = 1.8$, $\pi_c = 8.2$ (**сверхзвуковой оптимум**)



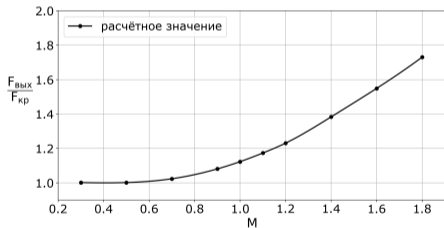
Трансзвуковой оптимум



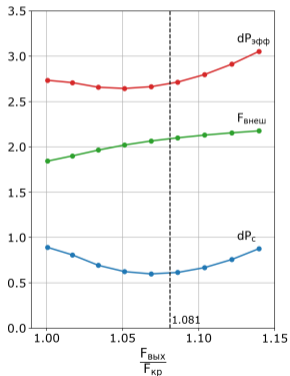
Сверхзвуковой оптимум

Управление раскрытием сверхзвуковых створок сопла

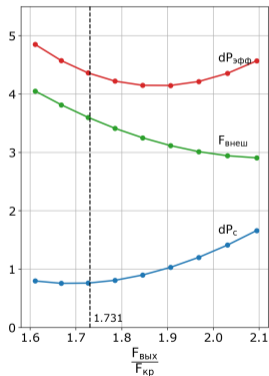
- Чтобы оценить эффективность сопла на рассматриваемом наборе режимов, необходимо знать закон управления раскрытием сверхзвуковых створок сопла
- Все параметры, кроме угла раствора сопла, были зафиксированы, а величина угла подбиралось оптимальной для каждого режима



Оптимальное управление раскрытием створок



Трансзвуковой оптимум

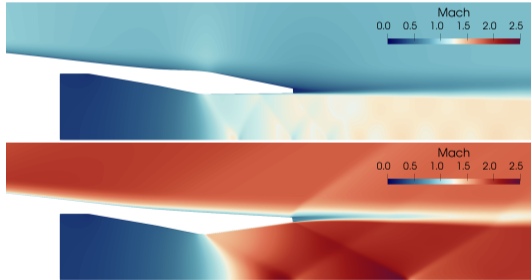


Сверхзвуковой оптимум

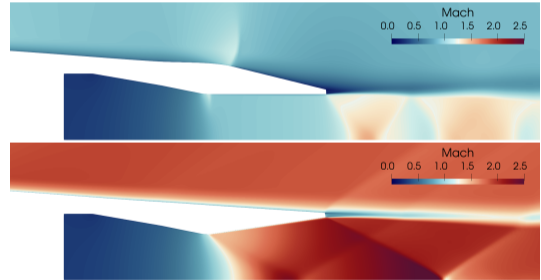
Однокритериальные оптимумы

Рассматриваются две **однокритериальные** задачи:

- оптимизация на трансзвуковом режиме полёта $M = 0.9$, $\pi_c = 2.9$ (**трансзвуковой оптимум**)
- оптимизация на сверхзвуковом режиме полёта $M = 1.8$, $\pi_c = 8.2$ (**сверхзвуковой оптимум**)



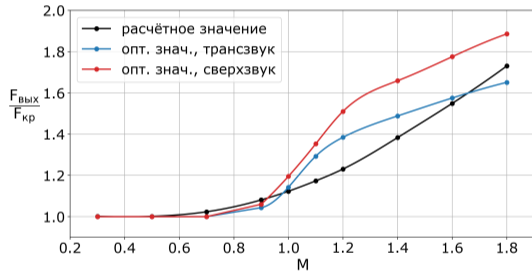
Трансзвуковой оптимум



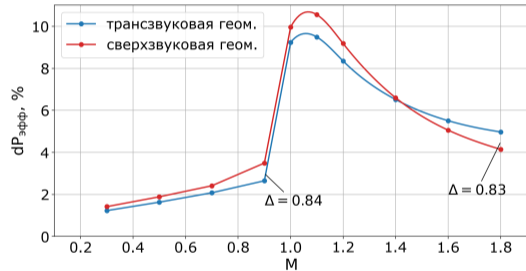
Сверхзвуковой оптимум

Результаты однокритериальной оптимизации

- Для каждой геометрии найден закон управления раскрытием створок сопла, учитывающий внешнее сопротивление. Он значительно отличается от расчётного.
- «Неоптимальность» вариантов на перекрёстных режимах примерно одинакова и равна 0.83 %.



Оптимальное управление раскрытием створок



Зависимость коэффициента потерь эффективной тяги сопла от M набегающего потока

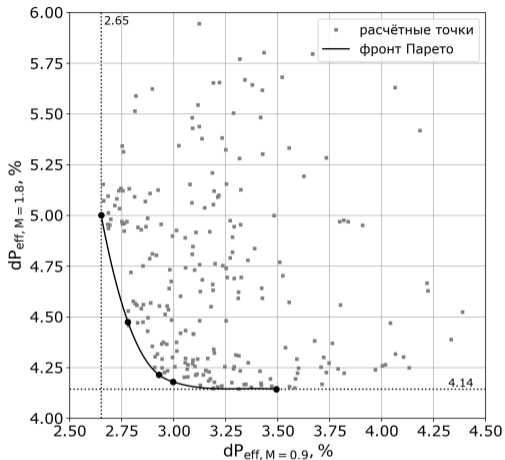
Многокритериальная оптимизация

- Точки **фронта Парето** находятся методом **скаляризации** — преобразования векторной целевой функции в скалярную посредством взвешенной суммы её компонент.
- Многокритериальная задача сводится к **множеству однокритериальных**, каждая из которых характеризуется набором весовых коэффициентов $\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_n\}$.

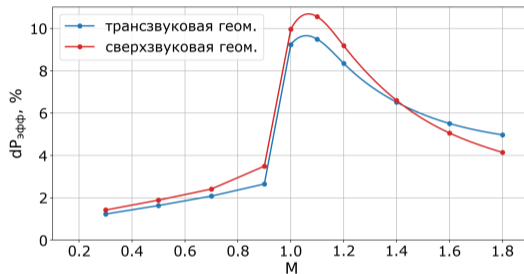
$$F_{obj} = \omega_1 f_1(x) + \dots + \omega_n f_n(x)$$

- Каждая однокритериальная задача решается методом эффективной глобальной оптимизации. При решении задач применяется ограничение на количество итераций (бюджет) равный 100 итерациям.
- К имеющимся точкам $\{1.0, 0.0\}$ и $\{0.0, 1.0\}$ **добавлены ещё три**: $\{0.3, 0.7\}$, $\{0.5, 0.5\}$ и $\{0.7, 0.3\}$.

Фронт Парето

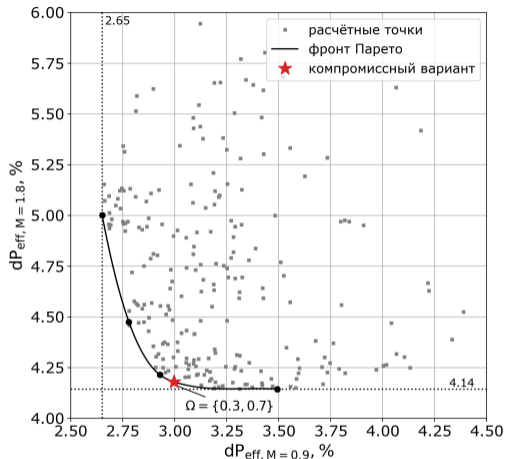


Фронт Парето многокритериальной задачи



Зависимость коэффициента потерь эффективной тяги сопла от M набегающего потока

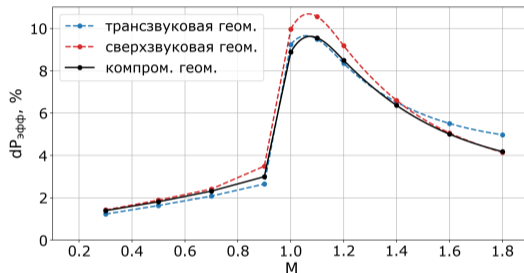
Фронт Парето



Фронт Парето многокритериальной задачи

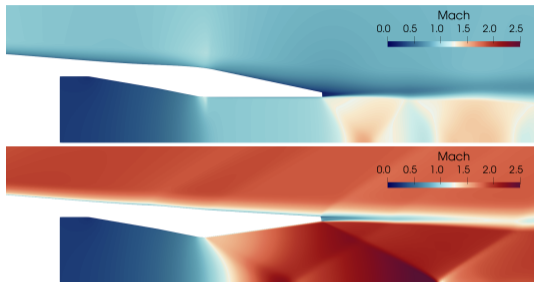
Выбрана **компромиссная точка** $\Omega = \{0.3, 0.7\}$.

Компромиссный оптимум располагается вблизи от точки сверхзвукового оптимума: при увеличении потерь на сверхзвуке на 0.04 % уменьшение потерь на транзвуке составляет 0.5 %.

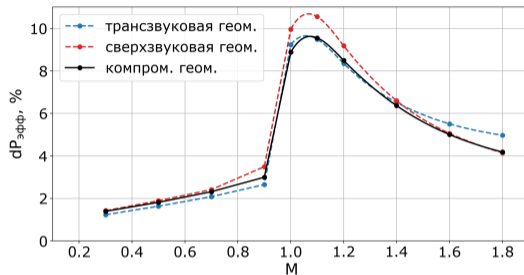


Зависимость коэффициента потерь эффективной тяги сопла от M набегающего потока

Компромиссная геометрия



Компромиссная геометрия



Зависимость коэффициента потерь эффективной тяги сопла от M набегающего потока

Выбрана **компромиссная точка** $\Omega = \{0.3, 0.7\}$.

Компромиссный оптимум располагается вблизи от точки сверхзвукового оптимума: при увеличении потерь на сверхзвуке на 0.04 % уменьшение потерь на транзвуке составляет 0.5 %.

Заключение

- **Продемонстрирована эффективность методики** оптимального аэродинамического проектирования выходных устройств летательных аппаратов с крейсерской сверхзвуковой скоростью полёта.
- **Решена модельная задача** аэродинамического проектирования хвостовой части изолированной осесимметричной гондолы ТРДД с $m \approx 3$.
- Решена **многокритериальная задача** (два крейсерских режима), построен фронт Парето.
- Выбрано **компромиссное решение** $\Omega = \{0.3, 0.7\}$.
Компромиссный оптимум позволяет снизить потери эффективной тяги сопла на транзвуке на 0.5 % (1.7 % тяги двигателя) при увеличении потерь на сверхзвуке на 0.04 %.
- Данный подход может быть использован для аэродинамического проектирования плоских выходных устройств СГС.