

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОПЛА
НА КОЭФФИЦИЕНТ РАСХОДА ДЛА**

©2016 А.Н. Сабирзянов, А.Н. Кириллова

Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А.Н. Туполева – КАИ

**THE NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE OF NOZZLE'S GEOMETRICAL
PARAMETERS ON AIRCRAFT ENGINES' DISCHARGE COEFFICIENT**

Sabirzyanov A.N., Kirillova A.N. (Kazan National Research Technical University
named after A.N Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation)

Multiparameter research of dependence of aircraft engine nozzle discharge coefficient on its geometrical parameters has been conducted using advanced CFD methods. Characteristic influence of a contour of supersonic section of the nozzle and its cylindrical section of the throat on nozzle discharge coefficient has been shown.

К основным проблемам реактивных сопел относятся вопросы определения газодинамических характеристик в зависимости от геометрических параметров сопел и газодинамических параметров реактивной струи, определения оптимальных геометрических параметров [1]. Одной из интегральных характеристик, определяющих совершенство реактивного сопла, является коэффициент расхода μ_c . В свою очередь, коэффициент расхода представляет собой произведение различных его составляющих: газодинамической; двухфазной; составляющей, учитывающей изменение площади критического сечения и деформацию элементов конструкции; составляющей, учитывающей изменение термодинамических свойств потока продуктов сгорания в результате многообразия протекающих процессов.

Разложение коэффициента расхода на его составляющие во многом идеализировано и целесообразно в рамках одномерного инженерного подхода. В реальных условиях все факторы, определяющие значение μ_c , взаимосвязаны и их совместное моделирование возможно современными методами вычислительной гидродинамики (CFD), не разделяя их между собой. Газодинамическая составляющая, учитывающая потери давления, неравномерность параметров и трение составляет основную долю всех потерь и в отношении данной составляющей μ_c накоплен достаточный экспериментальный и теоретический материал, необходимый для верификации моделей.

В данной работе объектом исследования являлись осесимметричные звуковые и сверхзвуковые сопла различной геометрии. В качестве рабочего тела рассматривались воздух и гомогенные продукты сгорания при различных параметрах.

Цель работы – обосновать применимость RANS моделей турбулентности и требуемое качество сетки для адекватного расчёта μ_c , что актуально при полномасштабном трёхмерном моделировании, получить параметрические зависимости, оценить влияние различных геометрических параметров на коэффициент расхода.

Основные исследуемые параметры, определяющие величину μ_c : угол наклона контура дозвуковой части сопла $\theta_{кр}$; отношение площадей (радиусов) критического и входного сечений $F_{кр}/F_{вх} (R_{кр}/R_{вх})$; скругление контура дозвуковой части сопла; газодинамические параметры потока; наличие и протяжённость цилиндрического участка минимального сечения; геометрические параметры сверхзвукового участка сопла.

Геометрическая модель включала дополнительный объём для моделирования истечения сверхзвуковой струи в свободное пространство, что исключало необходимость определения граничных условий на выходе из сопла.

В качестве моделей турбулентности рассматривались двухпараметрические модели семейства $k-\epsilon$ и четырёхпараметрическая переходная модель Ментора Transition

SST с типовым набором модельных констант.

Исследования проводились средствами программного продукта ANSYS-Fluent в рамках осесимметричной задачи в идеальном газе в приближении гомогенной среды для адиабатной постановки стационарной задачи.

В качестве примера проведённой верификации на рис.1 представлено сопоставление расчётных зависимостей коэффициента расхода конического звукового сопла, полученного с применением RNG модели турбулентности со стандартной пристеночной функцией, от угла наклона контура сопла и перепада давлений ($\pi_c = p_{oc}/p_\infty$, где p_{oc} , p_∞ – давление в камере сгорания и давление окружающей среды (атмосферное), соответственно) с некоторыми известными экспериментальными и расчётными данными.

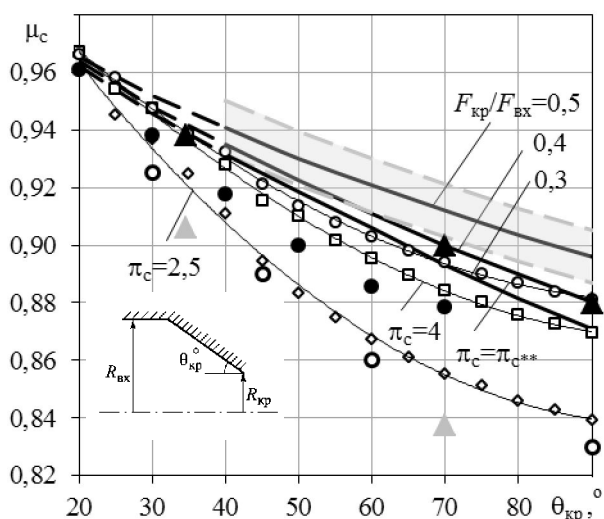


Рис.1. Коэффициенты расхода конических звуковых сопел: \circ – эксперимент [2] при $F_{кр}/F_{вх} = 0,5$ и $\pi_c = 2,5$; \bullet – расчёты [3] при $F_{кр}/F_{вх} = 0,25$; — (—) – обобщенные результаты [1] при $F_{кр}/F_{вх} = 0,5$ с погрешностью $\pm 1\%$ (—) и при $F_{кр}/F_{вх} = 0,4$ и $0,3$; \blacktriangle , \triangle , \blacktriangle – данные [1] при $F_{кр}/F_{вх} = 0,44$, \blacktriangle – $\pi_c \geq \pi_{c^{**}}$, \triangle – $\pi_c = 3$, \blacktriangle – $\pi_c = 2$; — – результаты расчётов данной работы при $F_{кр}/F_{вх} = 0,51$ (\diamond – $\pi_c = 2,5$, \square – $\pi_c = 4$, \circ – $\pi_c = \pi_{c^{**}}$)

Проведено сопоставление результатов моделирования, полученных с применением моделей турбулентности RNG, Realizable и Transition SST. Отличие результатов расчёта по моделям RNG и Realizable на относитель-

но грубой сетке не превышает 0,13 %. Сеточная независимость решения соответствует значению $y^+ \approx 1,5$. Применение улучшенной процедуры расчёта пристеночной функции (*ewt*) обеспечивает погрешность 1 % по сравнению со стандартной функцией стенки. Результаты, полученные по модели Transition SST, практически соответствует данным, рассчитанным по модели RNG (*ewt*). Максимальные различия в расчётных значениях коэффициента расхода в зависимости от применяемых моделей турбулентности и качества сетки не превышают 1 %.

Проведённые исследования показали, что современные методы вычислительной гидродинамики позволяют с достаточной точностью определить газодинамическую составляющую коэффициента расхода. Определено требуемое качество сетки для обеспечения заданной точности расчёта.

Показано, что профиль контура сверхзвуковой части сопла влияет на величину коэффициента расхода.

Показано влияние цилиндрического участка в минимальном сечении сопла в зависимости от угла контура дозвуковой части сопла на коэффициент расхода. Найдены оптимальные значения протяженности цилиндрического участка в минимальном сечении сопла.

Библиографический список

1. Лаврухин Г.Н. Аэрогазодинамика реактивных спел. Т.1. Внутренние характеристики сопел. – М.: Наука. ФИЗМАТЛИТ, 2003. 376 с.
2. Ralph E., Grey Jr., Dean W.H. Performance of conical jet nozzles in terms of flow and velocity coefficients (report 933) // National advisory committee for aeronautics - 1949. Lewis Flight Propulsion Laboratory. Cleveland, Ohio. Reproduced by National technical information service US department of commerce Springfield. VA. 22164.
3. Соколов В.Д., Ягудин С.В. Коэффициент расхода осесимметричных сужающих сопел с произвольным контуром // Учёные записки ЦАГИ, 1975. Т.VI, №1. С.117-121.