

Оценка возможностей различных подходов к моделированию турбулентности применительно к расчету сверхзвукового следа за донным срезом цилиндра

А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, А.К. Травин, М.Л. Шур
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

1. Введение

Задача о сопротивлении плохообтекаемых (с донным срезом) тел является одной из классических задач аэродинамики, для решения которой необходим достаточно точный расчет параметров потока в следе, формирующемся за телом. Ближний участок этого следа характеризуется наличием сложных вихревых структур, образующихся в процессе распада оторвавшегося от тела слоя смешения, и наличием зоны рециркуляции, вниз по потоку от которой начинает формироваться дальний след. При этом в случае сверхзвукового полета течение в следе осложняется его взаимодействием с невязким потоком, в котором возникают интенсивные волны разрежения и рекомпрессии (рис.1), а также существенным влиянием эффектов сжимаемости на характеристики турбулентности. Дополнительным фактором, усложняющим как моделирование турбулентности в следе, так и численное решение задачи, является цилиндрическая геометрия тела.

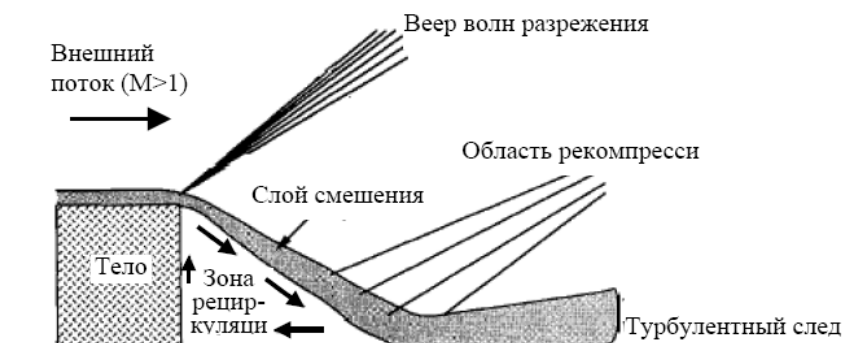


Рис.1. Схема сверхзвукового донного следа

Перечисленные обстоятельства делают задачу о расчете сверхзвукового следа за донным срезом цилиндра, рассматриваемую в настоящей работе, привлекательным (относительно простым по геометрии, с одной стороны, и содержащим все существенные элементы реальных течений, - с другой) тестом для оценки возможностей различных подходов к описанию турбулентности применительно к данному классу течений.

2. Постановка задачи

В настоящей работе соответствующее исследование было проведено для течения за донным следом цилиндра при числе Маха набегающего потока $M=2,46$, радиусе цилиндра $R=0,03175$ м, числе Рейнольдса, построенного по радиусу цилиндра, $Re=1,632 \times 10^6$, температуре торможения потока $T=293$ К и скорости

набегающего потока $U_\infty=564,2$ м/с (эти параметры соответствуют условиям проведения экспериментов в работе [1]).

Расчеты проводились на основе программы NTS code, позволяющей решать как стационарные, так и нестационарные уравнения сжимаемого газа. Для аппроксимации конвективных членов используются противопоточные схемы до 5-го порядка и центрально-разностные до 4-го порядка включительно, а также их комбинации. Вязкие члены и производные по времени аппроксимируются со вторым порядком точности.

На рис. 2 приведена схема расчетной области. В качестве граничных условий заданы:

- на твердых стенках - условия прилипания и адиабатичности;
- на входе – параметры внешнего потока;
- на выходе – линейная экстраполяция из внутренних точек.

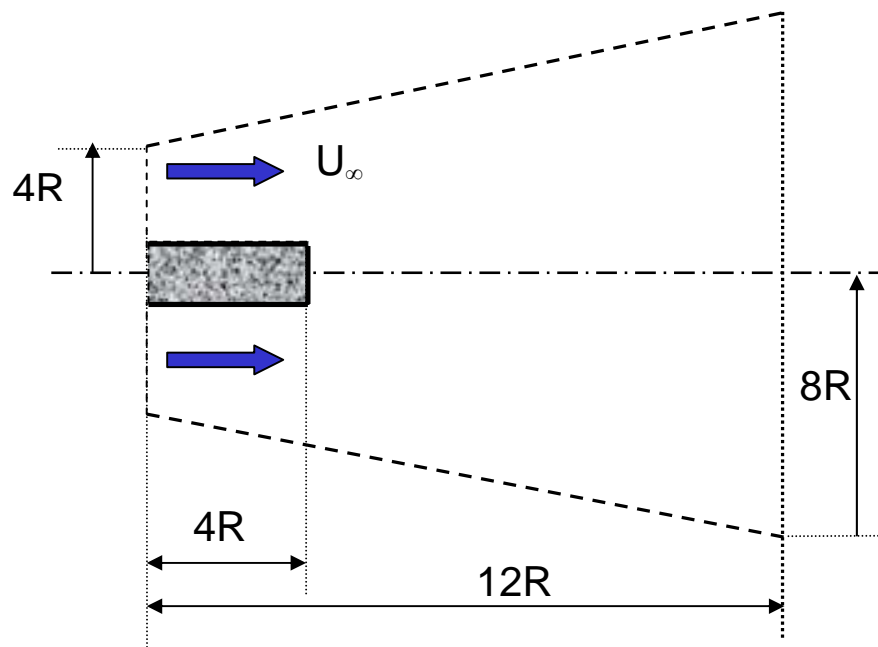


Рис.2. Схема расчетной области.

В работе использовались две сетки: грубая (1,8 млн ячеек) и мелкая (3,6 млн ячеек).

Для расчетов использовались два подхода к моделированию турбулентности: осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) замкнутые с помощью модели турбулентности Спаларта-Аллмараса [2] и ее модификации, учитывающей эффекты сжимаемости [3], и метод моделирования отсоединенных вихрей (Detached-Eddy simulation – DES [4]).

Полученные результаты сравнивались с имеющимися экспериментальными данными [1] и представляющими наибольший практический интерес, а именно по радиальному распределению статического давления по донному срезу цилиндра и полям скорости, числа Маха и Рейнольдсовых напряжений в ближнем следе.

3. Результаты расчетов

Первой задачей данного исследования было выяснение возможности предсказания характеристик данного течения в рамках уравнений Рейнольдса. На рис. 3-5 приведено сравнение результатов расчетов полученных с помощью модели турбулентности Спаларта-Аллмараса [2] и ее модификации [3].

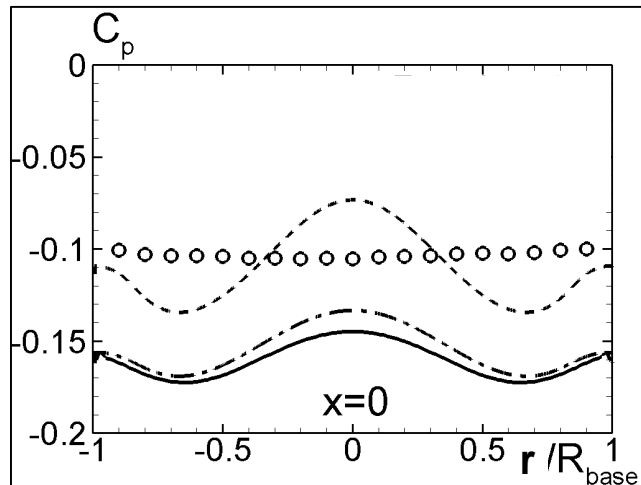


Рис.3. Радиальное распределение статического давления по донному срезу цилиндра. Точки – эксперимент, сплошная линия – модель турбулентности Спаларта-Аллмараса (результаты коллег из FOI), штрих-пунктир – модель турбулентности Спаларта-Аллмараса, штрихи - модель Спаларта-Аллмараса с поправкой на сжимаемость

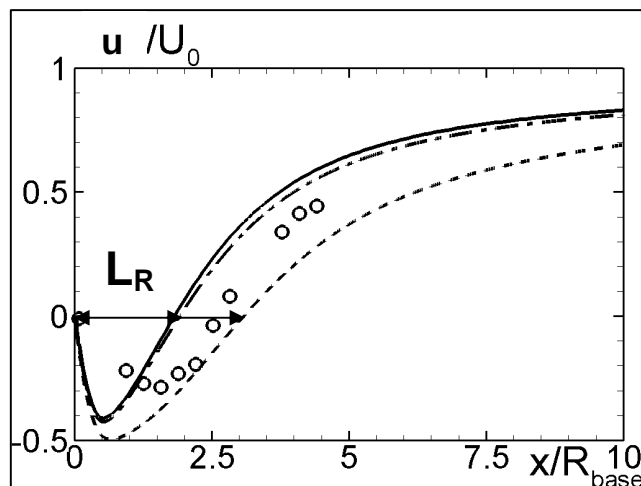


Рис.4. Распределение осевой скорости в ближнем следе (обозначения см. рис. 3)

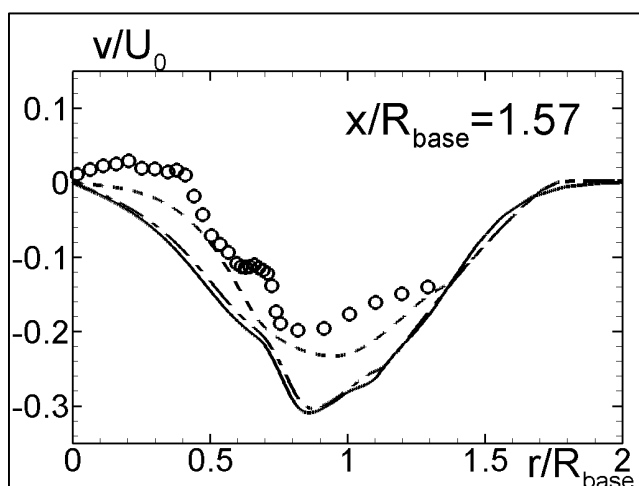


Рис.5. Распределение радиальной скорости в ближнем следе (обозначения см. рис. 3)

Видно, что оригинальная модель Спаларта-Аллмараса не в состоянии предсказать не только параметры потока в следе, но и важнейшую с практической точки зрения характеристику, напрямую влияющую на сопротивление – донное давление. Поправка, учитывающая эффекты сжимаемости в модели турбулентности Спаларта-Аллмараса [3] заметно улучшает результаты, но также не позволяет достаточно точно определить донное давление и параметры потока в ближнем следе.

Второй задачей данной работы было определение применимости метода DES к расчету течений в донном следе. На рис.6-8 приведено сравнение результатов, полученных по методу моделирования отсоединенных вихрей с экспериментальными данными.

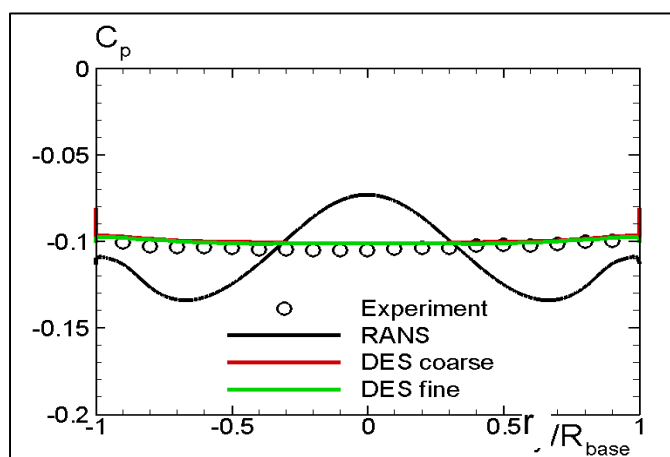


Рис.6. Радиальное распределение статического давления по донному срезу цилиндра

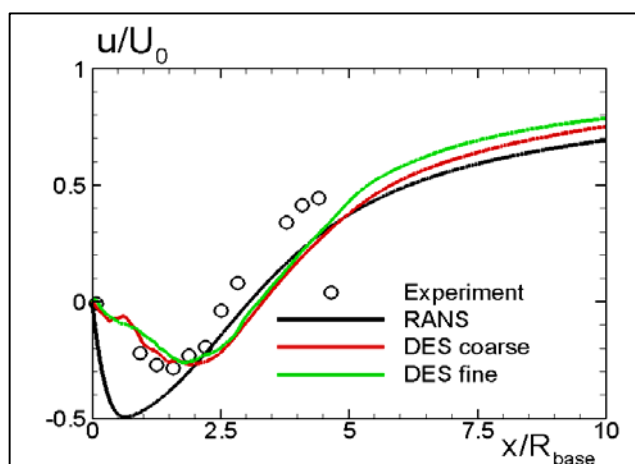


Рис.7. Распределение осевой скорости в ближнем следе

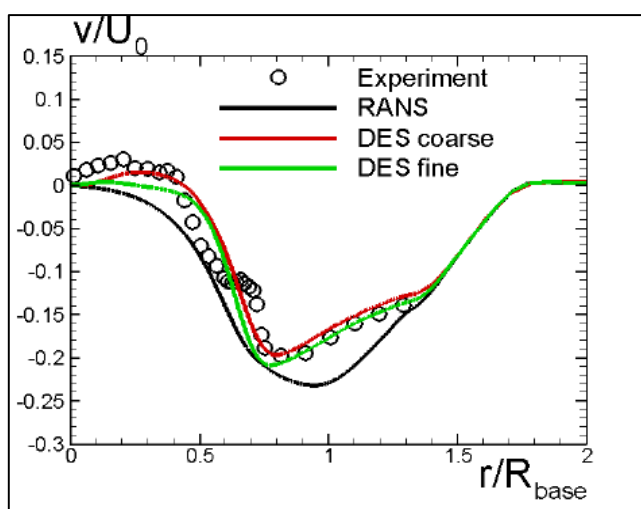


Рис.8. Распределение радиальной скорости в ближнем следе

Из рисунков видно, что моделирование по методу отсоединенных вихрей (DES) существенно превосходит по точности метод RANS и обеспечивает достаточно высокую точность расчета параметров осредненного течения не только на мелкой, но и на грубой сетке.

Однако точность предсказания пульсационных характеристик, особенно в слое смешения оставляет желать лучшего (рис. 9, 10а). Для выяснения причин такого рассогласования было проведено сравнение результатов расчетов в рамках DES с результатами расчетов рассматриваемого течения, полученными в рамках проекта DESider (<http://cfd.mace.manchester.ac.uk/desider>), выполнявшегося при поддержке Европейской комиссии (6-ая рамочная программа исследований, технологических разработок и демонстраций), исследовательской группой из ONERA (Франция), проводившей расчет на сетке с 20 млн ячеек.

Это сравнение (рис. 9, 10) свидетельствует о том, что достижения точного описания пульсационных характеристик слоя смешения в рамках DES требуются очень мелкие сетки. Хотя результаты ONERA на сетке с 20 млн ячеек более точно описывают пульсационные характеристики течения, чем результаты, полученные на

сетке с 3,6 млн ячеек, видно, что даже столь мелкой сетки недостаточно для разрешения начального участка слоя смешения.

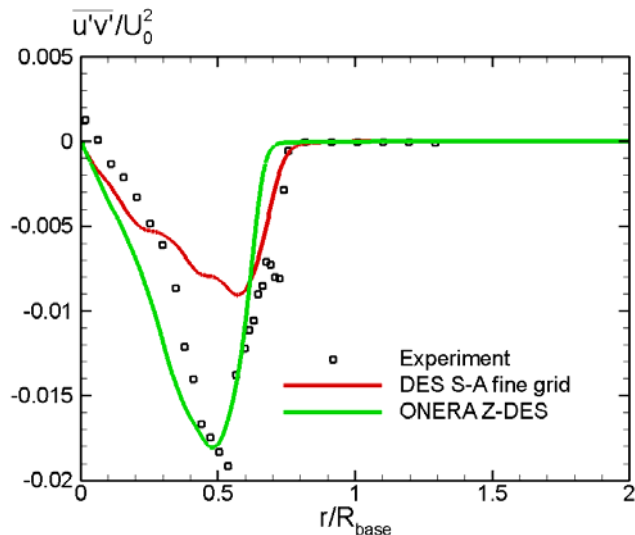


Рис.9. Касательные напряжения при $x/R=1.57$

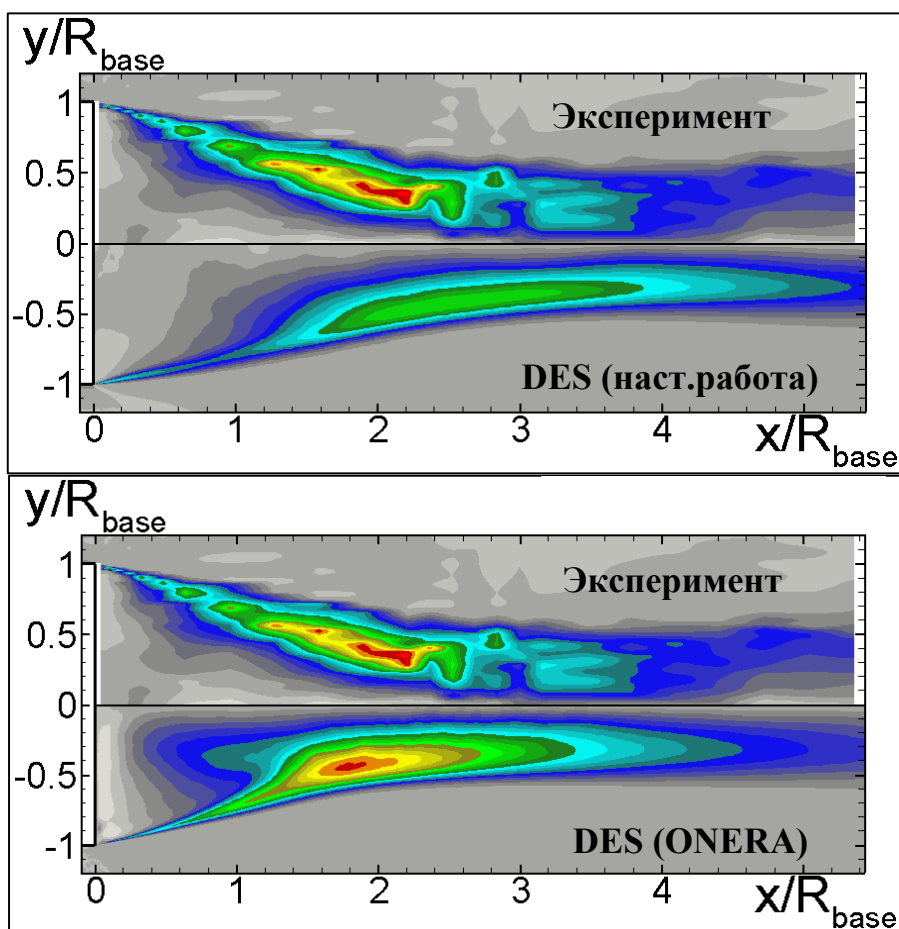


Рис.10. Поле турбулентных касательного напряжения $\overline{u'v'}$ за донным срезом

4. Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- стандартная модель турбулентности Спаларта-Аллмараса не обеспечивает приемлемой точности расчета основных характеристик течения;
- поправка на сжимаемость в модели турбулентности Спаларта-Аллмараса заметно улучшает согласование результатов расчета осредненного течения с экспериментом, но не позволяет с достаточной точностью предсказать его наиболее важные характеристики, прежде всего, донное давление;
- метод моделирования отсоединенных вихрей (DES) обеспечивает приемлемую точность расчета параметров осредненного течения;
- для достижения точного описания пульсационных характеристик слоя смешения в рамках DES требуются очень мелкие сетки.

Литература

1. Herrin, J.L., Dutton C.J., 1994, Supersonic Base Flow Experiments in the Near Wake of A Cylindrical Afterbody, *AIAA Journal*, V. 32, N 1, pp. 77-83
2. Spalart P.R., Allmaras S.R., 1994, A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows, *La Rech. Aerospaciale*, vol. 1 (1), pp. 5-21.
3. Spalart, P.R., 2000, Trends in Turbulence Treatments, AIAA Paper No. 2000-2306.
4. Spalart, P.R., Jou, W-H., Strelets, M., and Allmaras, S. R., 1997, Comments on the Feasibility of LES for Wings, and on a Hybrid RANS/LES Approach, *Advances in DNS/LES*, 1st AFOSR International Conference on DNS/LES, Greyden Press, Columbus, OH.