

МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКАХ

В.Е. Борисов

ИИМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва

borisov@keldysh.ru

Одной из наиболее актуальных задач современной аэродинамики является создание высокоскоростных летательных аппаратов для длительного атмосферного полета, в частности, пассажирского сверхзвукового самолета [1]. Возникающая вокруг него картина течения довольно сложна, и, как правило, сопровождается образованием вихревых структур, в частности, концевых вихрей на кромках крыльев и прочих деталей. Помимо вопроса безопасности полетов [2] отдельный интерес вызывает взаимодействие концевых вихрей от элементов конструкций с расположенными вниз по потоку частями летательного аппарата, которое может приводить к изменению его аэродинамических характеристик.

Корректное численное моделирование таких задач требует использования специальных алгоритмов и сеток большой размерности, неизбежно приводящее к массивному объему расчетных данных, требующих постобработки. Для этих целей применяются специально разработанные методы идентификации и визуализации вихревых течений, позволяющие выделить основные особенности течения, оценить параметры вихревых структур и их влияние на общую картину обтекания [3–5].

В настоящей работе приводится анализ применения различных критериев идентификации и визуализации вихревых течений для ряда модельных задач сверхзвукового обтекания элементов конструкций летательных аппаратов: одиночного вихря от крыла-генератора, пары вихрей от двух генераторов, тандема крыльев под несколькими углами атаки, течения с энергосложением.

Численное моделирование проводилось в рамках 1) системы нестационарных осредненных по Рейнольдсу и Фавру уравнений Навье-Стокса (URANS) с моделью турбулентности Спаларта-Алламарса (SA), либо 2) гибридного IDDES-SA подхода с аналогичной моделью турбулентности. Для идентификации и визуализации вихревых структур применялись метод максимальной завихренности, Q-критерий, λ_2 и λ_p -методы, Лютекс (Рортекс) критерий. Расчеты проводились на суперкомпьютере К-60, установленном в ИИМ им. М.В. Келдыша РАН, с помощью авторского программного комплекса ARES для расчета трехмерных турбулентных течений вязкого сжимаемого газа на высокопроизводительных вычислительных системах.

Полученные в расчетах результаты демонстрируют хорошую робастность методов идентификации на основе Лютекс-критерия, свободного по своему построению от сдвиговых и сжимающих компонент тензора скоростей деформации. В частности, в отличие от других методов идентификации это позволило для ряда задач избежать ложного определения вихревых структур.

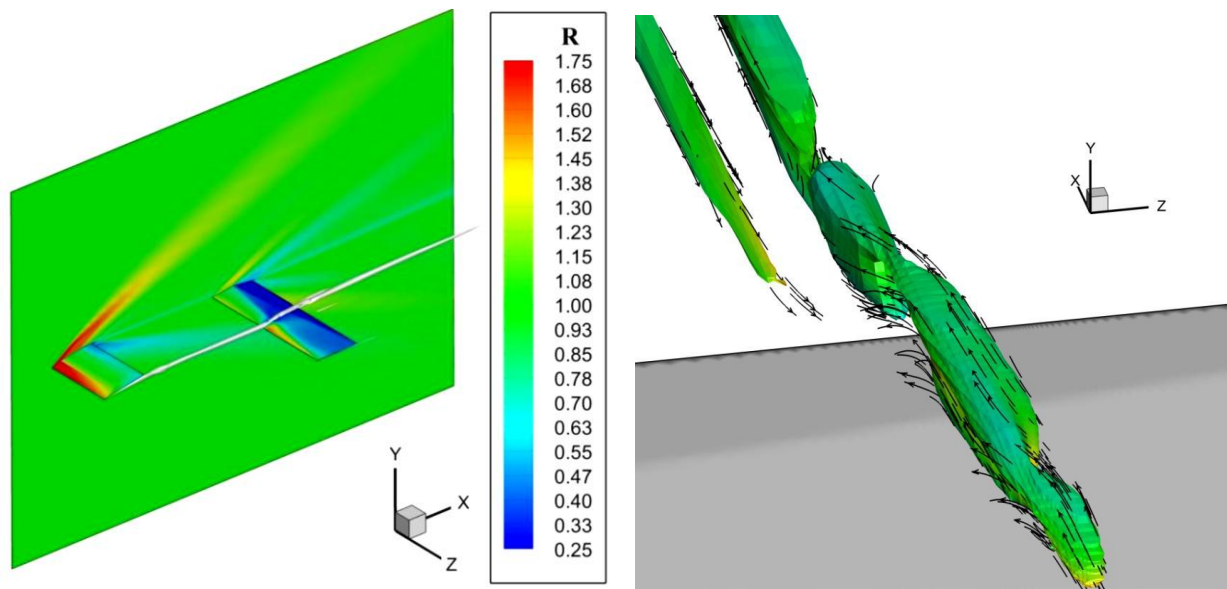


Рис. 1. Данные из работы [6]: распределение плотности на поверхности тандема крыльев совместно с изоповерхностью Лютекс-критерия (слева) и Рортекс-векторы вдоль этой изоповерхности (справа).

В иллюстративных целях для одного из расчетов тандема (результаты ранее опубликованы в работе [6]) на рис. 1 приведены распределение плотности на поверхности крыльев совместно с изоповерхностью Лютекс-критерия $\Omega_R=0.59$, а также Рортекс-векторы на этой изоповерхности, показывающие локальное направление движения вихревых элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-21-00230.

Список литературы:

1. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. На пути к созданию модели виртуального ГЛА. – М.: ИПМех РАН. 2013. 160 с.
2. Гиневский А.С., Желанников А.И. Вихревые следы самолетов. – М.: Физматлит. 2008. 172 с.
3. Chakraborty P., Balachandar S., Adrian R.G. On the relationships between local vortex identification schemes // J. Fluid Mech. 2005. V. 535. P. 189–214.
4. Волков К.Н. Методы визуализации вихревых течений в вычислительной газовой динамике и их применение при решении прикладных задач // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 3 (91). С. 1–10.
5. Jiang M., Machiraju R., Thompson D. Detection and visualization of vortices // Visualization Handbook. Burlington: Elsevier. 2005. P. 295–309.
6. Борисов В.Е., Константиновская Т.В., Луцкий А.Е. Исследование вихревых структур при сверхзвуковом обтекании тандема крыльев // Математическое моделирование. 2022. Т. 34. № 6. С. 92–110.