

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ЗАДАЧАХ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**В.Е. Борисов, Т.В. Константиновская, А.Е. Луцкий**  
*ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, borisov@keldysh.ru*

Существующий уровень технологий позволяет вновь вернуться к вопросу развития сверхзвукового транспорта, ставя перед конструкторскими бюро задачу проектирования конкурентоспособных сверхзвуковых пассажирских самолетов нового поколения. Такие аппараты имеют сложную форму, характеризующуюся наличием многих конструктивных элементов. Картина течения вокруг них довольно сложна, и, как правило, сопровождается образованием вихревых структур, в частности, концевых вихрей на кромках крыльев и прочих деталей. Так, концевые вихри, возникшие в передней зоне течения, могут существенно повлиять на обтекание, включая теплообмен, элементов конструкции, расположенных вниз по потоку, что приводит к изменению аэродинамических характеристик аппаратов.

Изучение всех этих явлений практически невозможно без проведения соответствующих вычислительных экспериментов [1]. При этом 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 [2–4].

В докладе будут представлены результаты применения различных критериев идентификации вихревых течений для ряда задач сверхзвукового обтекания элементов конструкций летательных аппаратов: одиночного вихря от крыла-генератора, пары вихрей от двух генераторов, течения с энерговложением, тандема крыльев под несколькими углами атаки (рис. 1).

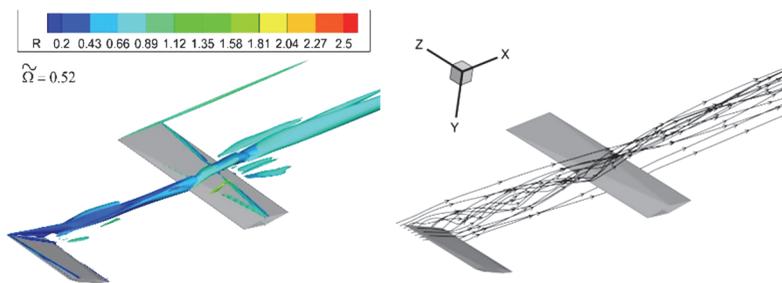


Рис. 1. Концевой вихрь от крыла–генератора и его взаимодействие с основным крылом. Исоповерхность Лютекса–критерия  $\Omega = 0.52$  (слева) и линии тока (справа)

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,  $\lambda_2$  и  $\lambda_c$ -методы, Лютекс (Портекс) критерий. Расчеты проводились на суперкомпьютере К-60 [5], установленном в ИМП им. М.В. Келдыша РАН, с помощью авторского программного комплекса ARES для расчета трехмерных турбулентных течений вязкого сжимаемого газа на высокопроизводительных вычислительных системах.

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

## Литература

1. Братухин А.Г., Серебрянский С.А., Стрелец Д.Ю. и др. Цифровые технологии в жизненном цикле Российской конкурентоспособной авиационной техники. – М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. – 448 с.
2. Chakraborty P., Balachandar S., Adrian R.G. On the relationships between local vortex identification schemes. J. Fluid Mech. 2005. V. 535, pp. 189–214.

3. Волков К.Н. Методы визуализации вихревых течений в вычислительной газовой динамике и их применение при решении прикладных задач. Научно-тех. вестник инф. технологий, механики и оптики. 2014. № 3 (91). С. 1–10.
4. Jiang M., Machiraju R., Thompson D. Detection and visualization of vortices. Visualization Handbook. Burlington: Elsevier. 2005, pp. 295–309.
5. Вычислительный комплекс К-60. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kiam.ru/MVS/resources/k60.html>