

Куркин Е. И., Ляскин А. С., Шахов В. Г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ВОКРУГ ПРОФИЛЕЙ С РОТОРНОЙ МЕХАНИЗАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕГО ПОДХОДА

Отрыв потока на поверхности крыла вызывает потери энергии, возникновение неустойчивости и другие негативные последствия. Обычно отрыв потока происходит в условиях, при которых достигаются рабочие характеристики, близкие к максимальным, к примеру, при большом угле атаки. Управление пограничным слоем, позволяющее предотвратить отрыв потока или уменьшить величину отрывной зоны, расширяет диапазон условий работы крыла и существенно увеличивает его эффективность. Применение вращающихся цилиндров на передних кромках закрылков помогает существенно снизить скорость посадки самолетов, что повышает безопасность полетов и дает возможность использовать более короткие взлетно-посадочные полосы.

В работе изучено обтекания профиля крыла, образованного дугами окружностей, с установленным в его носовой части вращающимся цилиндром. Диаметр вращающегося цилиндра равен 50 мм, хорда крыла равна 200 мм. Основная часть профиля переходит в цилиндр так, что имеет общую с ним касательную в точке присоединения. Между вращающимся цилиндром и основой профиля имеется щель 0,5 мм. Скорость набегающего потока воздуха равна 30 м/с, отношение скорости вращения поверхности цилиндра к скорости набегающего потока  $U = 0,5$ . Угол атаки равен 0 и 10°.

Выбор модели турбулентности существенным образом сказывается на описании обтекания профиля крыла с роторной механизацией. Полученные на основе усредненных по Рейнольдсу  $k-\epsilon$  и SST моделей турбулентности решения имеют качественные отличия в поведении коэффициента сопротивления и существенные отличия в значениях коэффициентов подъемной силы и аэродинамического качества, что делает актуальной задачу более глубокого исследования турбулентного потока при обтекании профиля крыла с роторной механизацией с применением вихреразрешающих моделей турбулентности.

Определение масштабов дискретизации расчетной области, необходимых для разрешения крупновихревых структур, проведено на основе предварительного решения задачи с использованием RANS моделей турбулентности. Длины ячеек LES области составляют вблизи крыла от 0,25 мм, исходя из значений безразмерного расстояния до стенки  $y^+ = 1$  на стенке, от 0,3 - 0,5 мм по критерию Колмогорова и не превышают 0,7 - 1,5 мм по интеграль-

ному критерию. В итоге длина ячеек LES области принята равной 0,4 мм. Толщина пристенной ячейки для обеспечения  $y^+ = 1$  составляет 0,005 мм. Толщина слоя ячеек по размаху крыла равна 0,5 мм.

Для отработки технологии исследования двумерных задач с учетом LES моделей турбулентности создана плоская сетка и выдавлена на 4 слоя по 0,5 мм для трехмерного решения развития крупновихревых структур турбулентности. На боковых гранях расчетной области установлено условие периодичности.

Задача моделирования течения решена методом конечных объемов в системе ANSYS CFX на суперкомпьютере «Сергей Королев» (Самара, СГАУ). Все расчетные сетки построены в ICEM CFD, имеют блочную структуру и состоят из элементов гексагональной формы.

При решении задачи использован зональный подход. LES модель используется для 796 916 ячеек в зоне предполагаемого отрыва потока над верхней частью крыла. Область использования LES модели окружена внешней RANS областью длиной 1 500 мм, шириной 1 000 мм, содержащей 5 957 924 ячеек LES масштаба и 2 416 000 ячеек RANS масштаба.

Расчёт задачи проводился в три этапа: на нулевом шаге по времени решается задача в стационарной постановке с использованием RANS модели турбулентности во всей области, расчёт нестационарного решения с использованием зональной LES модели турбулентности длительностью порядка двух времён прохождения потоком LES области для распространения и развития крупновихревых структур турбулентного течения (рис. 1 а, б) и расчёт нестационарного зонального LES решения с осреднением параметров потока (рис. 1 в, г). Шаг по времени принят равным  $10^{-6}$  с, поскольку при этом число Куранта не превышает 1,2 в области решения LES модели турбулентности. Сравнивая значения усредненных полей скоростей и давлений, а также усреднённые значения распределения давления на поверхности профиля, можно сделать вывод о хорошей повторяемости результатов, что свидетельствует о достаточном времени для записи статистики при исследовании профиля с роторной механизацией.

Верификация рассмотренных моделей турбулентности при исследовании течения вокруг профиля с роторной механизацией проведена путем сравнения с результатами эксперимента по измерению распределения давления на модели профиля крыла с роторной механизацией в аэродинамической трубе Т-3 СГАУ. Для измерения давления использован 32 канальный электронный микроанометр, соединенный гибкими трубками с отверстиями на профиле модели. Для получения информации о распределении давления на вращаю-

шемся предкрылке в центре экспериментальной модели установлена неподвижная проставка, к которой подведены трубки измерения давления.

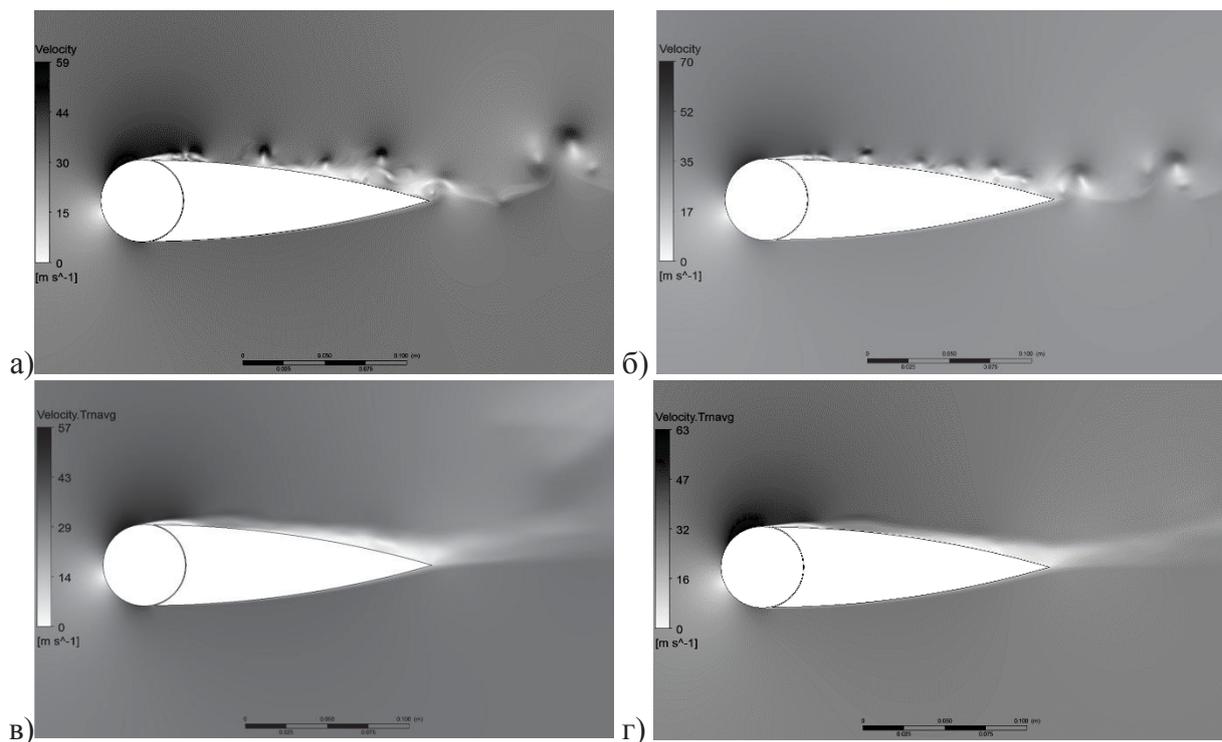


Рисунок 1 – Мгновенное (а, б) и усредненные (в, г) поля скоростей после второго накопления статистики для LES модели турбулентности: а, в)  $U = 0$ , б, г)  $U = 0,5$

Результаты исследования распределения давления при скорости набегающего потока 30 м/с и угле атаки  $10^\circ$  представлены на рис. 2. Можно отметить хорошее соответствие расчетов и эксперимента при  $x/b > 0,3$ . Эта область соответствует основной части крыла за вращающимся предкрылком. При этом при  $U = 0$  и  $x/b > 0,3$  зональная LES модель дает более близкие к эксперименту результаты. Можно предположить, что расхождение результатов эксперимента в области вращающегося предкрылка ( $x/b < 0,3$ ) вызвано тем, что в эксперименте измерение давления проводилось не непосредственно на вращающемся цилиндре, а на неподвижной проставке.

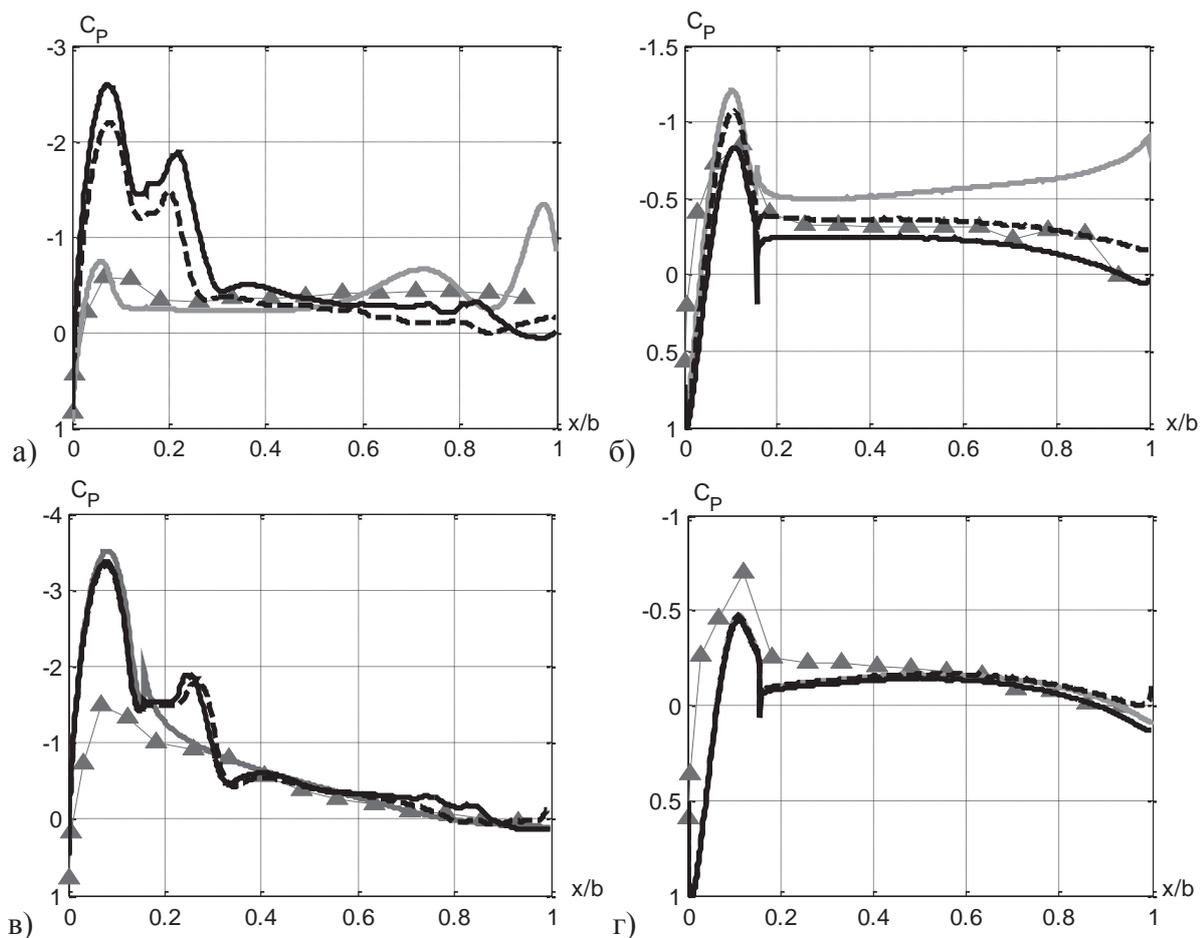


Рисунок 2 – Распределение давления для первого и второго накопления статистики LES модели турбулентности на верхней (а, в) и нижней (б, г) поверхностях крыла: а, б)  $U = 0$ , в, г)  $U = 0,5$ ,  $\blacktriangle$  - эксперимент, — SST модель, - - - - - LES модель, первое накопление статистики, — LES модель, второе накопление статистики