

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ТОЛСТЫХ ПРОФИЛЕЙ С НЕТРАДИЦИОННОЙ МЕХАНИЗАЦИЕЙ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Исследование аэродинамических характеристик профилей при малых числах Рейнольдса имеет большое значение для разработки малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (микроБПЛА). Для крыльев таких аппаратов целесообразно использовать толстые профили, так как они обеспечивают высокие несущие свойства и при этом предоставляют большие внутренние объёмы для размещения систем и агрегатов аппарата или полезной нагрузки. В работе рассматривались простые симметричные профили, носовая часть которых представляет собой полуэллипс, а хвостовая образована двумя дугами окружности.

Предварительные численные исследования показали, что для рассматриваемых чисел Рейнольдса порядка $1 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^5$ при относительной толщине профиля 20% и более наблюдается аномальная зависимость коэффициента подъёмной силы от угла атаки – при малых положительных углах атаки подъёмная сила отрицательна (рис. 1). Такое явление было описано в [1], там же объясняется его механизм – нижняя поверхность обтекает безотрывно, и при этом разряжение, возникающее на ней, существенно больше, чем на верхней поверхности, на которой происходит отрыв потока. Так как такой характер зависимости подъёмной силы затрудняет практическое использование рассматриваемых профилей в исходном виде, то были исследованы возможности изменения их характеристик с помощью различных видов механизации.

Всего было рассмотрено два вида механизации – так называемый парусный закрылок, представляющий собой тонкую пластину, сдвигающуюся вдоль верхней поверхности профиля (рис. 2) и роторный предкрылок, представляющий собой вращающийся цилиндр в носовой части профиля (рис. 3).

Численное исследование обтекания профилей с данными видами механизации проводилось путём решения уравнений Навье-Стокса с помощью пакета Star-CD. Расчёты проводились как в стационарной, так и в нестационарной постановке, и рассматривалось как ламинарное, так и турбулентное обтекание.

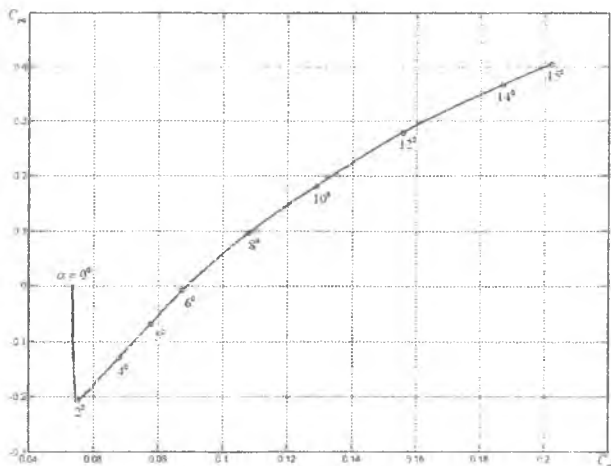


Рис. 1. Поляра профиля, демонстрирующая anomalous dependence of the lift coefficient on the angle of attack at the Reynolds number $Re = 5 \cdot 10^4$



Рис. 2. Профиль с парусным закрылком, выдвижение закрылка $\bar{b}_3 = 0,2$

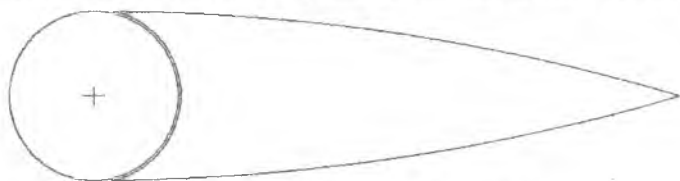


Рис. 3. Профиль с роторным предкрылком

Полученные результаты показали, что применение механизации позволяет получить монотонную зависимость коэффициента подъёмной силы от угла атаки и, кроме того, повышает несущие свойства рассматриваемых профилей. Проведённое исследование позволило изучить в деталях картину обтекания механизированных профилей, что важно как для понимания основных принципов работы рассмотренных видов механизации, так и для построения расчётных схем более простых численных методов, например, метода дискретных вихрей.

Для профиля с парусным закрылком основной особенностью течения является

обширная рециркуляционная зона в углу, образованном нижней поверхностью профиля и закрылком. Предварительные расчеты на грубой сетке показали, что она состоит из одиночного вихря большой интенсивности. В связи с этим было выдвинуто предположение о возможности моделирования обтекания профиля с парусным закрылком с помощью метода дискретных вихрей по схеме «профиль в присутствии вихря». Затем было проведено более детальное исследование течения в рециркуляционной зоне с целью определения интенсивности вихря, положения его центра, координат точек отрыва и переприсоединения потока. Для этого расчеты проводились на измельченной сетке и в нестационарной постановке. При этом выяснилось, что измельчение сетки выявляет отрывы второго и более высоких порядков, течение носит существенно нестационарный характер – за первой точкой отрыва наблюдается «чехарда» вторичных вихрей, которые затем сносятся вниз по потоку и поглощаются основным вихрем в рециркуляционной зоне.

Исследование распределения завихренности показало, что кроме вихрей существенная концентрация завихренности наблюдается в сдвиговом слое, разделяющем рециркуляционную область и внешнее течение (он является продолжением пограничного слоя за первой точкой отрыва). Так как рассматривались малые числа Рейнольдса, то толщина этого слоя достаточно велика (сравнима с размерами рециркуляционной области), а сосредоточенная в нём завихренность практически полностью компенсирует завихренность в рециркуляционной зоне. Отсюда можно сделать вывод, что предложенная на основе предварительных результатов схема «профиль в присутствии вихря» недостаточно адекватно отражает кинематику течения.

Если для профиля с парусным закрылком все расчеты проводились только в двумерной постановке, то для профиля с роторным предкрылком расчеты проводились в трёхмерной постановке. Это связано с тем, что одной из целей данных расчетов был подбор параметров экспериментальной модели, разрабатывавшейся для испытаний в аэродинамической трубе. На основании полученных результатов была выбрана ширина проставки, на которой размещались приёмники давления, а также величины радиальных и осевых зазоров между роторным предкрылком и остальными элементами модели. Также было показано, что распределение давления, снимаемое с неподвижной проставки, качественно согласуется с распределением давления на вращающемся роторном предкрылке. При этом для их количественного согласования в пределах точности 5...10% можно ввести множитель, который практически не зависит от скорости вращения предкрылка, но зависит от угла атаки.

Исследования картины обтекания профиля с роторным предкрылком позволили установить корреляцию между изменениями размера отрывной зоны, образующейся на нижней поверхности профиля из-за встречного движения поверхности вращающегося предкрылка, и изменением коэффициента сопротивления в зависимости от относительной скорости вращения. С ростом скорости размеры стационарного вихря, образующегося у нижней поверхности, быстро растут. Значительному изменению координаты точки переприсоединения при увеличении относительной скорости соответствует значительное увеличение коэффициента сопротивления. Максимальных размеров вихрь достигает при относительной скорости вращения $\bar{V} = 3$, тогда же наблюдается и максимум сопротивления. С дальнейшим ростом относительной скорости точка переприсоединения сдвигается вперед, т. е. размеры вихря уменьшаются; одновременно с этим уменьшается и сопротивление.

Библиографический список

1. Вышинский, В.В. Применение численных методов в задачах аэродинамического проектирования [Текст] / Вышинский В В., Судаков Г.Г. // Труды ЦАГИ. – 2007. – Вып. 2673. – 123 с.