

ВЫБОР ФОРМЫ КРЫЛА ОПРЕДЕЛЯЕТ АЭРОДИНАМИКУ И ЗАМЕТНОСТЬ САМОЛЕТА



Валерий ВОЖДАЕВ,
ведущий научный сотрудник ЦАГИ
им. проф. Н.Е. Жуковского,
кандидат технических наук

Передние кромки крыла и других аэродинамических поверхностей являются важными отражающими элементами малозаметного летательного аппарата при нормальном падении волны. По методу физической оптики проведены расчеты ЭПР крыла, показывающие влияние угла стреловидности χ на значения ЭПР в передней полусфере. Рассматривалось крыло с профилем NACA0006 размахом 14 м, площадью 80 м² с углами стреловидности 10, 20, 30 и 40°. Максимальные ЭПР на осевых ракурсах соответствуют прямому нестреловидному крылу. Для стреловидных крыльев с малыми углами стреловидности (10°) максимальные значения ЭПР смещаются на ракурсы γ 10 и 10° (рис. 1, а). Однако при небольших отклонениях по курсу падающая волна может отразиться строго в направлении на РЛС.

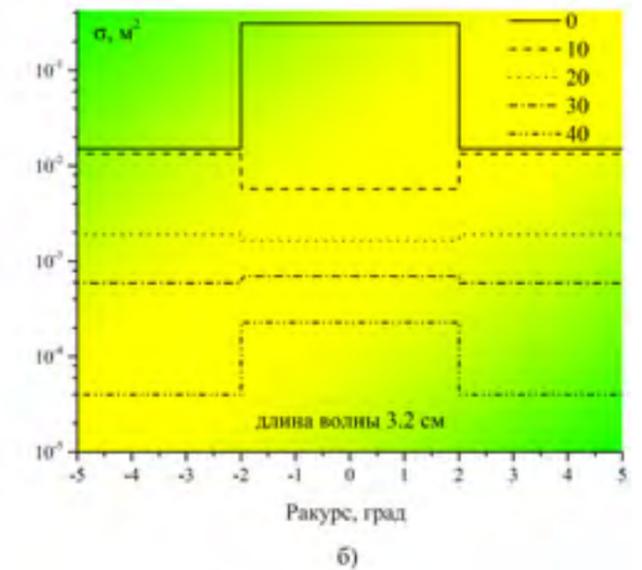
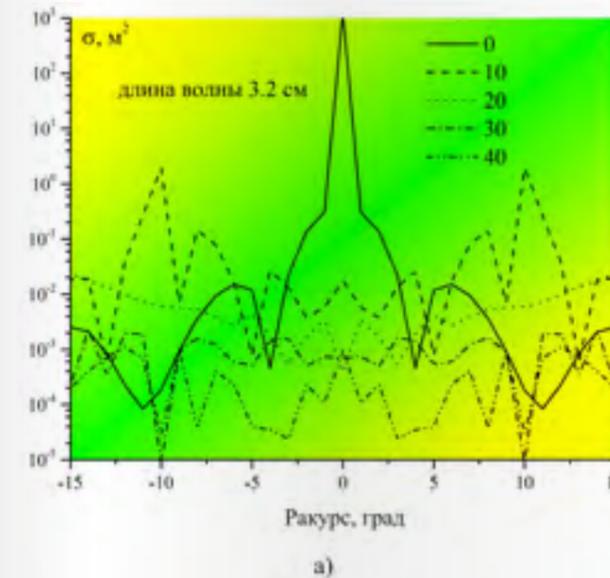


Рис. 1. Влияние угла стреловидности крыла на характеристики заметности при θ -поляризации и длине волны 3,2 см: а – неосредненные значения ЭПР; б – медианные значения ЭПР, усредненные по 4-градусным секторам

Как известно, для самолета наиболее вероятным вариантом локации является фронтальное направление облучения. При увеличении угла стреловидности крыла пики отражений на диаграмме ЭПР удаляются друг от друга по углу обзора, снижая медианные значения ЭПР на осевых (фронтальных) ракурсах (рис. 1, б). При заданном размахе рост угла стреловидности увеличивает длину передней кромки крыла, что приводит к некоторому повышению максимального значения ЭПР.

Для достижения малых медианных ЭПР в передней полусфере необходимо применять крылья с углами стреловидности более 30° (см. рис. 1, б). Крылья различной формы с фиксированным углом стреловидности $\chi = 40^\circ$ по передней и задней кромкам и одинаковым размахом $l = 13.6$ м показаны на рис. 2. У ромбовидного,

треугольного и пилообразного крыльев все кромки имеют одинаковую стреловидность, и в связи с этим на диаграмме ЭПР наблюдается пик отражений в передней полусфере на ракурсе 40° (передняя кромка крыла), в задней полусфере на ракурсе 140° (задняя кромка крыла), а также на ракурсе 90° (острая законцовка крыла). Для крыла треугольной формы из-за наличия прямой (нестреловидной) задней кромки на ракурсе 180° от нее имеет место пик отражений (рис. 3, а). Кроме того, у такого крыла на углах атаки больше нуля (при облучении крыла снизу) на осевом ракурсе, равном нулю, будет присутствовать отражение от задней кромки (рис. 3, б). Таким образом, расчеты, выполненные по методу физической оптики, продемонстрировали, что при согласо-

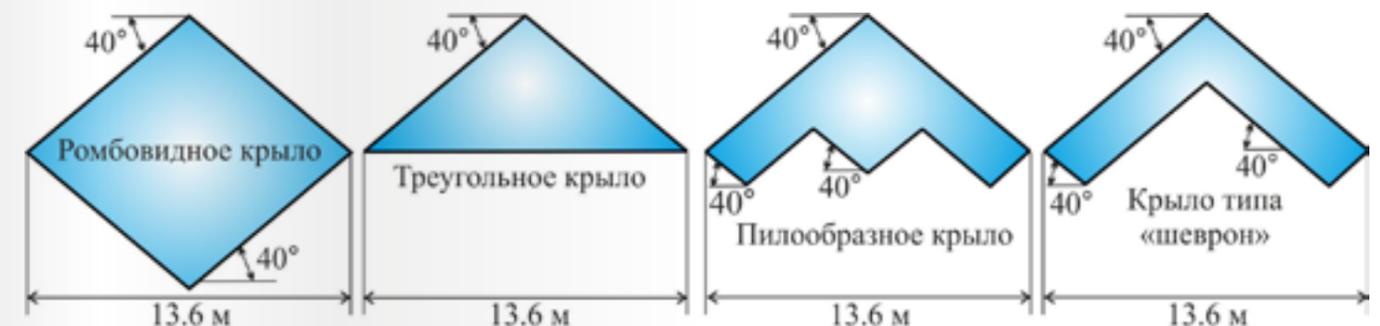


Рис. 2. Крылья различной формы

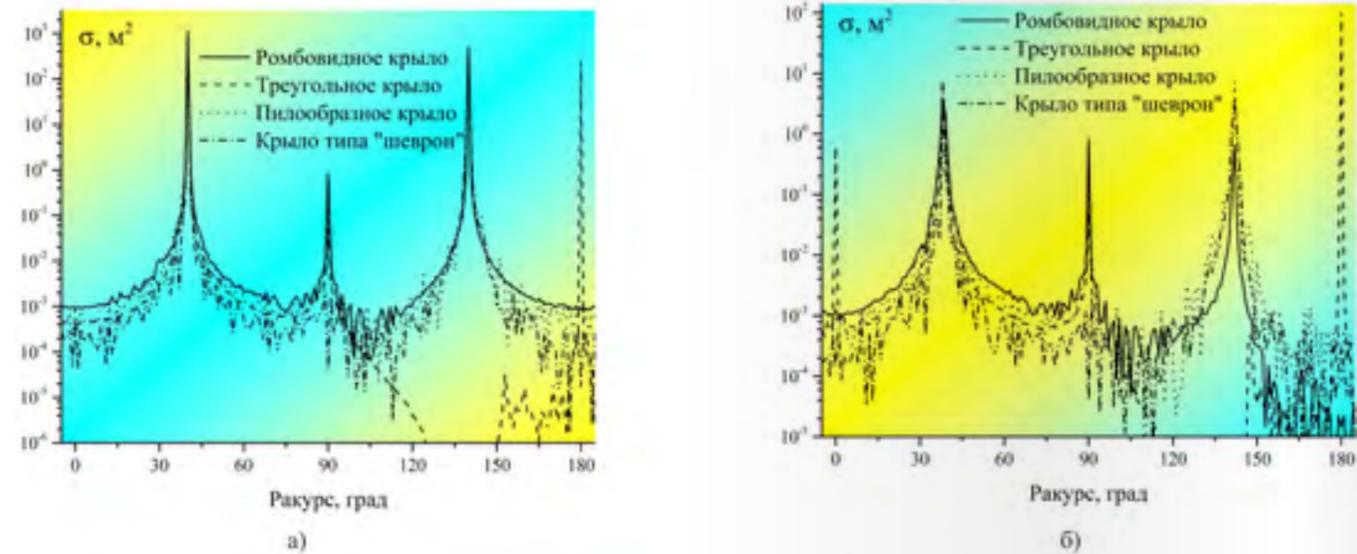


Рис. 3. Моностатические диаграммы ЭПР крыльев различных форм: а – нулевой угол атаки; б – угол атаки 20°; длина волны 3.2 см, θ – поляризация градусов

вании углов стреловидности передней и задней кромок у ромбовидного и пилообразного крыльев, а также у крыла типа «шеvron» примерно одинаковый уровень обратного рассеяния.

Поскольку по аэродинамическим показателям рассмотренные выше крылья существенно различаются при $M=0,8$, были выполнены расчетные исследования влияния формы крыла в плане на аэродинамические характеристики с использованием панельного метода, базирующегося на

трехмерных уравнениях потенциального течения несжимаемой жидкости. Вычисления показали, что наибольшая разница между условным центром тяжести $x_{ц.т.}$ и фокусом x_f соответствует крылу ромбовидной формы (рис. 4, а). Следует отметить, что под центром тяжести понимается геометрический центр соответствующей фигуры. Для наиболее полной информации для каждого крыла на диаграммах рис. 4 приведено отношение l^2/S . Величины c_y^a для сравниваемых крыльев показаны на рис. 4, б. Таким образом,



Рис. 4. Аэродинамические характеристики крыльев различных форм в плане: а – запас устойчивости; б – несущие свойства; l – размах, S – площадь

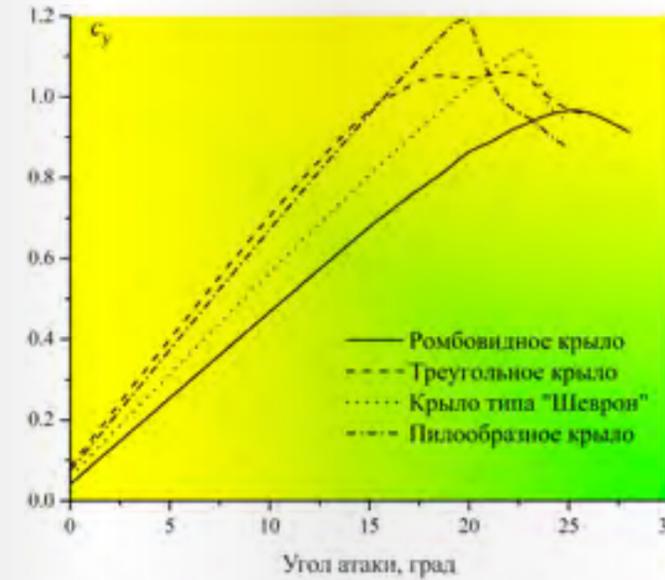


Рис. 5. Зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки для крыльев различных форм

оптимальными с точки зрения положения аэродинамического фокуса и характеристик заметности являются пилообразное крыло и крыло типа «шеvron».

С помощью численных решений уравнений Навье – Стокса были проведены расчеты трехмерного обтекания рассмотренных выше крыльев с профилями NACA M12. Наибольшее значение максимального коэффициента подъемной силы соответствует пилообразному крылу, а наименьшее – ромбовидному (рис. 5). Визуализации трехмерных линий тока, приведенные на рис. 6,

показывают характер обтекания крыльев на углах атаки, соответствующих максимальному коэффициенту подъемной силы.

В работе [Predicting the Maximum-Lift Performance of UCAV Planforms Using the Euler Equations. EUCASS2013] представлено исследование влияния формы крыла БПЛА на его характеристики заметности и аэродинамики. Рассматривались два варианта БПЛА (рис. 8). Угол стреловидности БПЛА с крылом одинарной стреловидности равен 40° (рис. 7, а), а в случае двойной стреловидности углы составляют 60 и 40° (рис. 7, б). С использованием численных решений уравнений Максвелла, реализованных с помощью конечно-разностного метода, построены диаграммы ЭПР двух вариантов БПЛА, соответствующие частоте облучения 9 ГГц. Как и следовало ожидать, БПЛА с крылом одинарной стреловидности имеет меньшие величины ЭПР (рис. 8, а), поскольку на диаграмме ЭПР БПЛА с крылом двойной стреловидности наблюдается еще один пик отражений на ракурсе 60° (рис. 8, б). Отметим, что на осевых ракурсах облучения для обоих вариантов величины ЭПР достаточно значительные. Это обстоятельство можно объяснить наличием в расчетных моделях каналов воздухозаборников, на стенки которых не нанесено радиопоглощающее покрытие. Для обоих вариантов БПЛА на ракурсах задней полусферы имеется ряд пиков отражений, обусловленных, вероятно, присутствием в расчетных моделях сопел. Однако в работе [Predicting the

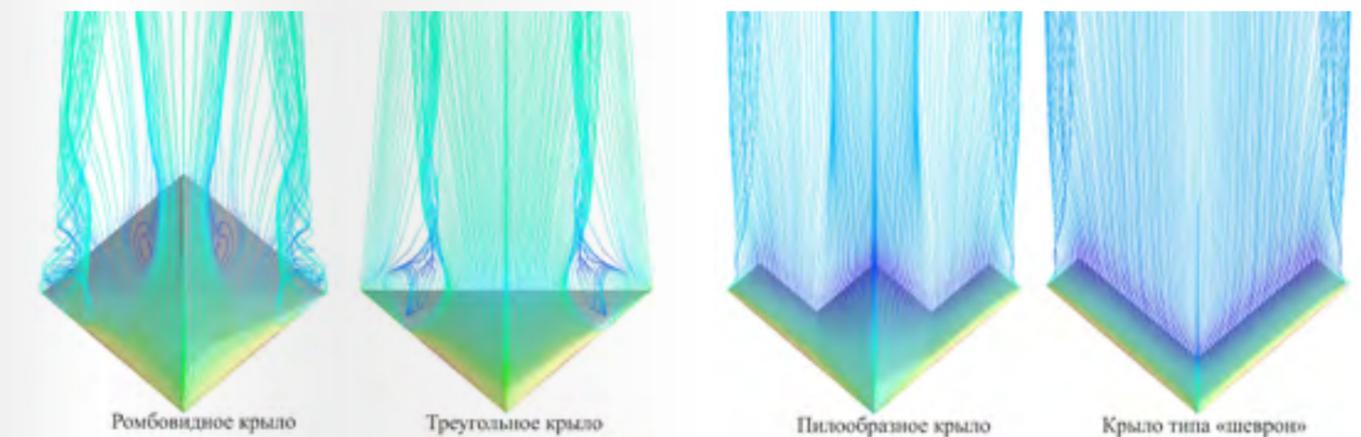
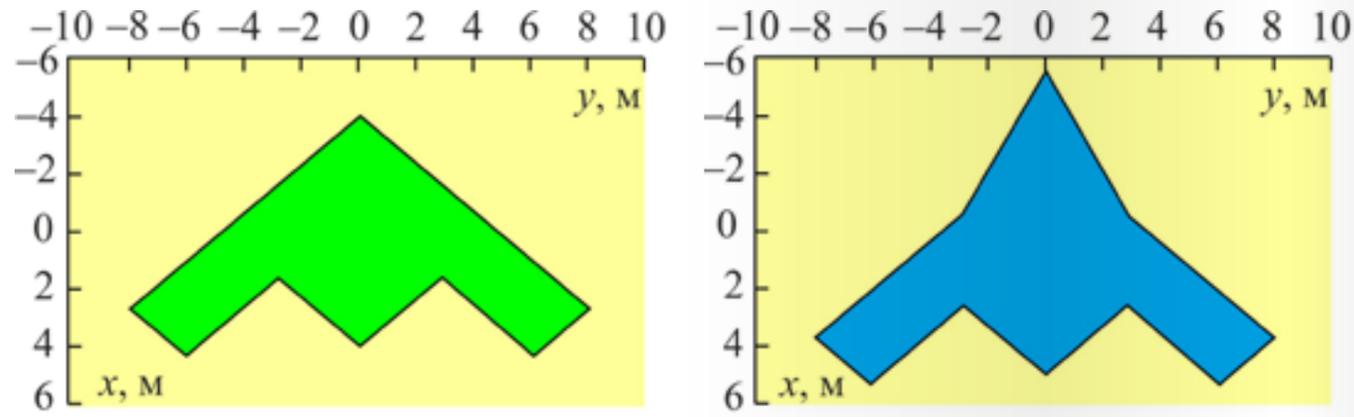


Рис. 6. Линии, выходящие с передней кромки крыльев различных форм при обтекании, соответствующем максимальному значению коэффициента подъемной силы



а)

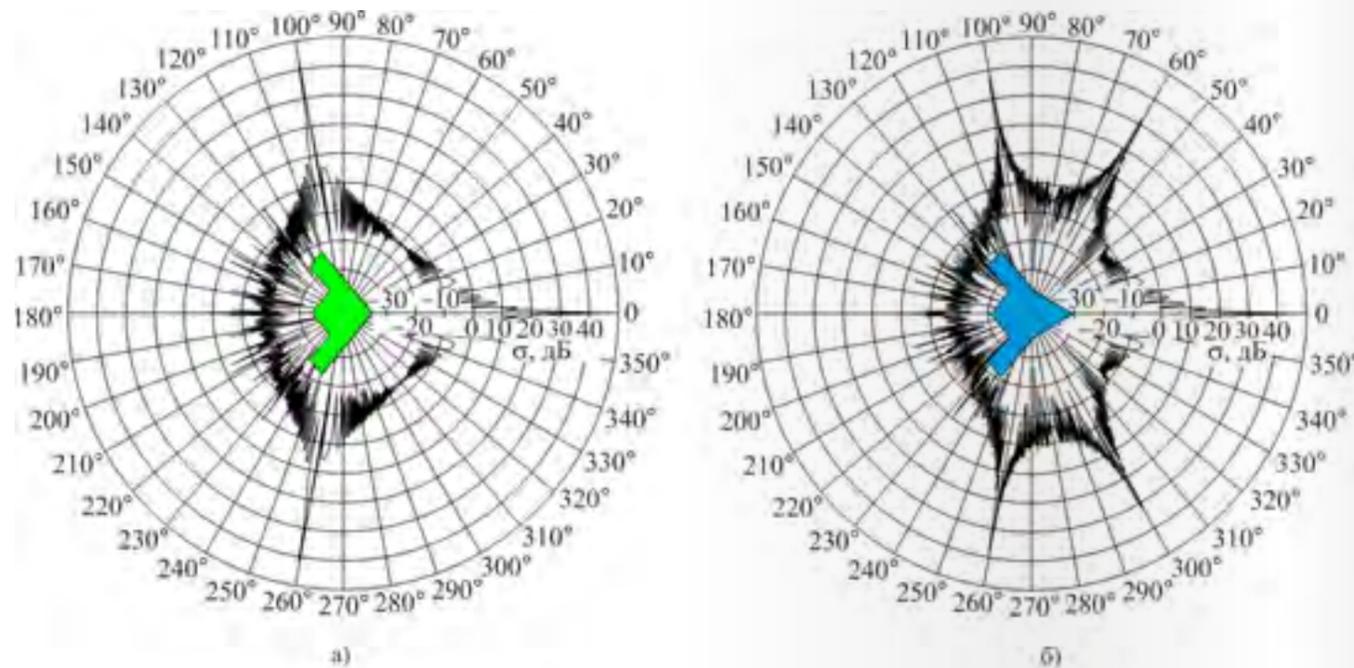
б)

Рис. 7. Вид БПЛА в плане: а – БПЛА с крылом одинарной стреловидности; б – БПЛА с крылом двойной стреловидности

Maximum-Lift Performance of UCAV Planforms Using the Euler Equations. EUCASS2013] нет информации о каналах воздухозаборников и сопл исследуемых моделей БПЛА.

Расчетные и экспериментальные зависимости коэффициентов аэродинамических сил от угла атаки для двух вариантов БПЛА (см. рис. 8) показаны на рис. 10 [Predicting the Maximum-Lift Performance of UCAV Planforms Using the Euler

Equations. EUCASS2013]. Измерения проводились в аэродинамической трубе малых скоростей на моделях, выполненных в масштабе 1:20. Расчеты осуществлялись по нескольким методам, в числе которых метод подковообразных вихрей (vortex-lattice method), метод подковообразных вихрей с разворотом подсосывающей силы (vortex-lattice method with suction analogy) и метод, основанный на уравнениях Эйлера. Сравнение расчетных и экспериментальных



а)

б)

Рис. 8. ЭПР БПЛА при частоте 9 ГГц:

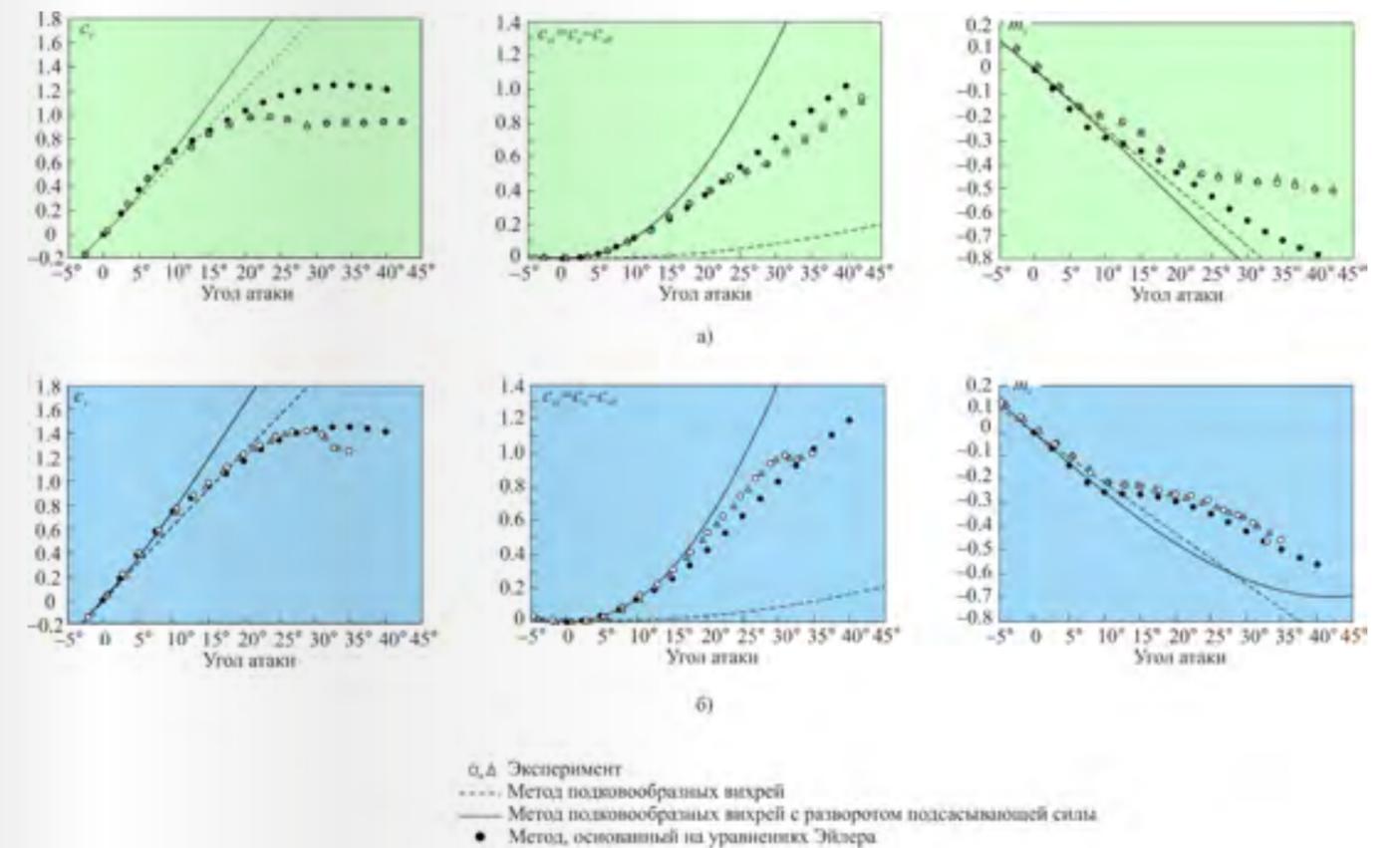
а – БПЛА с крылом одинарной стреловидности; б – БПЛА с крылом двойной стреловидности

значений коэффициента подъемной силы показывает, что оба варианта метода подковообразных вихрей не способны определять максимальные коэффициенты подъемной силы.

На основе численных решений уравнений Эйлера можно найти начало нелинейного участка зависимости коэффициента подъемной силы от угла атаки. По-видимому, начало нелинейного участка зависимости $c_y(\alpha)$ обусловлено отрывом вихрей с передней кромки крыла. Следует отметить, что совпадение результатов расчетов по уравнениям Эйлера с экспериментальными данными лучше для варианта БПЛА с крылом двойной стреловидности [Predicting the Maximum-Lift Performance of UCAV Planforms Using the Euler Equations. EUCASS2013]. Это можно объяснить тем, что методика, основанная на уравнениях Эйлера, демонстрирует более точные результаты по определению отрыва на крыле с большой стреловидностью.

Сравнение зависимостей, представленных на рис. 9, показывает, что по коэффициенту подъемной силы наиболее оптимальным является БПЛА с крылом двойной стреловидности. Индуктивное сопротивление c_{xi} , напротив, меньше у модели БПЛА с крылом одинарной стреловидности (рис. 9, а). Из зависимости момента тангажа m_z от угла атаки видно, что при углах атаки более 25° у модели БПЛА с крылом двойной стреловидности сохраняется положение аэродинамического фокуса, в отличие от модели БПЛА с одинарной стреловидностью (см. рис. 7), которая при этих углах атаки становится статически неустойчивой (см. рис. 9, б).

Таким образом, в данной работе рассмотрено влияние формы крыла на его величину ЭПР и аэродинамическое совершенство. Показано, что рациональный выбор формы крыла позволяет обеспечить малый уровень радиолокационной заметности и потребные аэродинамические характеристики.



а)

б)

σ, Δ Эксперимент
 - - - - Метод подковообразных вихрей
 — Метод подковообразных вихрей с разворотом подсосывающей силы
 ● Метод, основанный на уравнениях Эйлера

Рис. 9. Коэффициенты аэродинамических сил:

а – БПЛА с крылом одинарной стреловидности; б – БПЛА с крылом двойной стреловидности