Численные исследования особенностей интерференции крыльев биплана и тандемных крыльев летательных аппаратов

© О.В. Павленко,[1,2] Тханг Нгок Чинь[1]

[1] Московский физико-технический институт,
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия
[2] Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского,
140180 Жуковский, Московская обл., Россия
e-mail: olga.v.pavlenko@yandex.ru, trinhngocthang7488131215@gmail.com

Поступило в Редакцию 26 апреля 2025 г.
В окончательной редакции 9 июля 2025 г.
Принято к публикации 4 сентября 2025 г.

Представлены результаты численных исследований улучшения компоновки самолета на солнечных панелях с точки зрения аэродинамических и моментных характеристик. С использованием программы, основанной на решении осредненных по Рэйнольдсу уравнений Навье–Стокса, проведены численные исследования летательных аппаратов типа моноплан, биплан и тандем. Выполнено сравнение аэродинамических характеристик самолетов типа биплан и тандем с монопланом при одинаковой общей площади поверхности крыльев. Показаны особенности обтекания и интерференции конструкции самолетов с различными типами крыльев.

Ключевые слова: моноплан, биплан, тандем, аэродинамические характеристики, CFD-методы.

DOI: 10.61011/JTF.2025.12.61801.272-25

Самолеты, использующие в полете солнечную энергию, — это своеобразный тип летательных аппаратов, несущие поверхности которых максимально покрыты фотоэлементами, которые преобразуют солнечную энергию в электрический ток [1]. Для получения наибольшего количества солнечной энергии на таких самолетах делают крылья сверхбольшого удлинения и максимально используют все горизонтальные поверхности для установки солнечных панелей, вес которых может достигать до 25 % веса летательного аппарата [2]. Поэтому вес основной конструкции облегчают за счет использования легких и прочных материалов, например, углепластика. Вследствие увеличения площади несущей поверхности, большого размаха крыла, размещения силовой установки на его концах и при этом максимального снижения веса крыла существенно снижается устойчивость летательного аппарата, особенно в неспокойной атмосфере, что повышает требования к динамической прочности конструкции [3]. Поэтому конструкцию солнечных самолетов постоянно стараются оптимизировать.

С целью улучшения компоновки самолета на солнечных панелях с точки зрения аэродинамических и моментных характеристик проведены численные исследования летательных аппаратов типа биплан и тандем. Отличие тандемных крыльев от крыльев биплана состоит в том, что они расположены не одно над другим, а друг за другом: одно спереди, а другое сзади.

Численные исследования проведены на структурированной расчетной сетке, содержащей около семи миллионов ячеек, на трех компоновках самолета (рис. 1) при одинаковой общей площади поверхности крыльев $S = 8.6\,\text{m}$, с одинаковой хордой крыла $b = 0.6\,\text{m}$, фюзеляжем с круглым поперечным сечением и однокилевым хвостовым оперением с размещением стабилизатора на фюзеляже.

Расчеты выполнены в диапазоне углов атаки $-2^\circ \le \alpha \le 20^\circ$ при числах Маха $M = 0.045$ и Рэйнольдса $\text{Re} = 0.3 \cdot 10^6$.

Сравнительный анализ результатов численных исследований самолетов показал существенные различия в их аэродинамических характеристиках. Так, у данных компоновок летательных аппаратов различные несущие свойства, в первую очередь связанные с разным размахом крыльев: наибольшей максимальной подъемной силой обладает моноплан, а наименьшей — тандем. По сравнению с монопланом у биплана линейный участок зависимости $C_y(\alpha)$ вдвое больше. Производная функции подъемной силы биплана по углу атаки C_y^α на линейном участке в диапазоне $0 \le \alpha \le 5^\circ$ меньше, чем у моноплана, в 1.3 раза, максимальная подъемная сила $C_{y\,\max}$ меньше на 18 %, но при этом его критический угол атаки на 3° больше (рис. 2, *a*). Моноплан имеет меньшее сопротивление C_D по сравнению с другими компоновками, вследствие чего на графике рис. 2, *a* его поляра расположена левее. На докритических углах атаки наименьшее сопротивление у моноплана, а компоновка типа „тандем“ обладает меньшим сопротивлением, чем биплан.

Следует отметить, что из всех рассмотренных в настоящей работе моделей самолетов, моноплан обладает не только лучшими несущими качествами, но и наименьшим сопротивлением, а следовательно, и большим аэродинамическим качеством, от которого напрямую зависит дальность полета (рис. 2, *b*). В качестве недостатка моноплана можно отметить, что из-за крыла большого размаха он подвержен неустойчивости по крену [4].

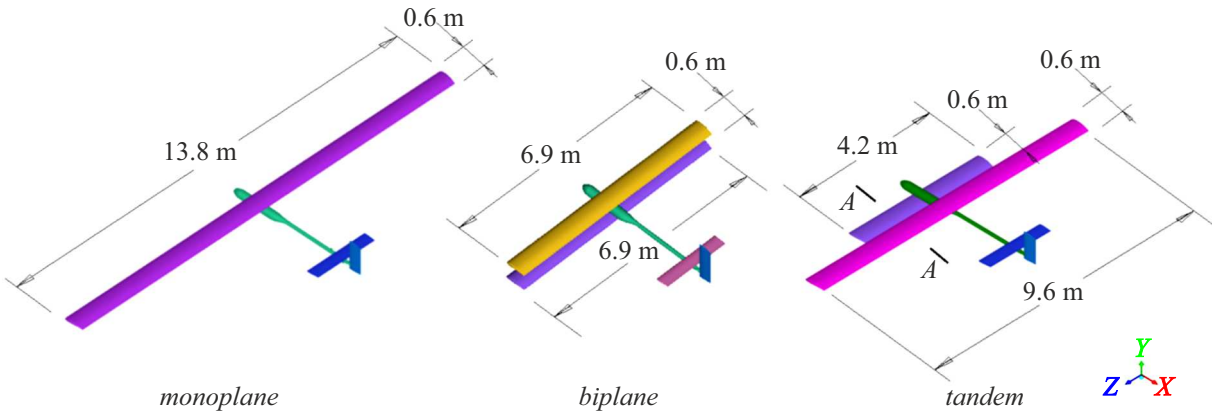


Рис. 1. Общий вид расчетных моделей самолетов.

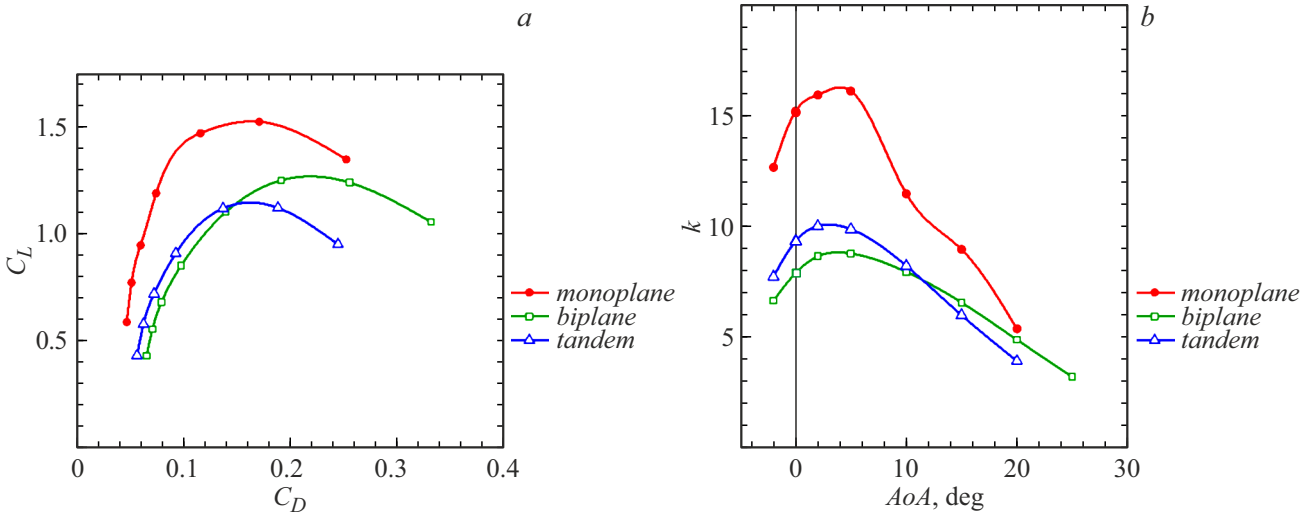


Рис. 2. Аэродинамические характеристики самолетов: *a* — поляра, *b* — зависимость аэродинамического качества от угла атаки.

Коэффициент момента тангажа рассчитывался у всех компоновок относительно 20 % длины фюзеляжа. В диапазоне докритических углов атаки $-2^\circ \le \alpha \le 10^\circ$ производная коэффициента момента тангажа моноплана $m_z^\alpha = -0.025$, что в 1.5 раза больше на пикирование, чем у биплана, имеющего производную $m_z^\alpha = -0.016$. Производная коэффициента момента тангажа тандема $m_z^\alpha = -0.091$, что в 3.5 раза больше моноплана и в 5.5 раза больше биплана. Из рассмотренных типов самолетов, компоновка типа тандем на докритических углах атаки имеет самый большой момент тангажа на пикирование.

Распределение коэффициента давления на угле атаки $AoA = 0$ в сечении крыла $A{-}A$ плоскостью XOY, $z = 1.05$ m у различных типов самолетов показано на рис. 3. В сравнении с сечением крыла моноплана видно, что у крыльев биплана происходит отрицательная интерференция: между крыльями поток разгоняется, и вследствие этого верхнее крыло уменьшает разрежение на верхней поверхности нижнего, а нижнее крыло уменьшает давление на нижней поверхности верхнего крыла (рис. 3, *b*).

У крыла тандема также существует отрицательная интерференция крыльев, состоящая в том, что такое расположение крыльев приводит к увеличению скорости между ними и разрежению давления, вследствие чего давление на нижней поверхности верхнего крыла меньше, а следовательно, его подъемная сила меньше, чем у моноплана, (рис. 3, *c*).

С точки зрения проектирования самолета на солнечной энергии, необходимо иметь наибольшую площадь поверхности, покрытую солнечными панелями, устойчивую с точки зрения динамики полета и прочности компоновку самолета, обладающую хорошими аэродинамическими характеристиками. Моноплан с крылом большого удлинения при всех аэродинамических преимуществах имеет серьезные недостатки, такие, как его неустойчивость по крену, а также подверженность крыла большого размаха флаттеру, аэроупругим деформациям и дивергенции.

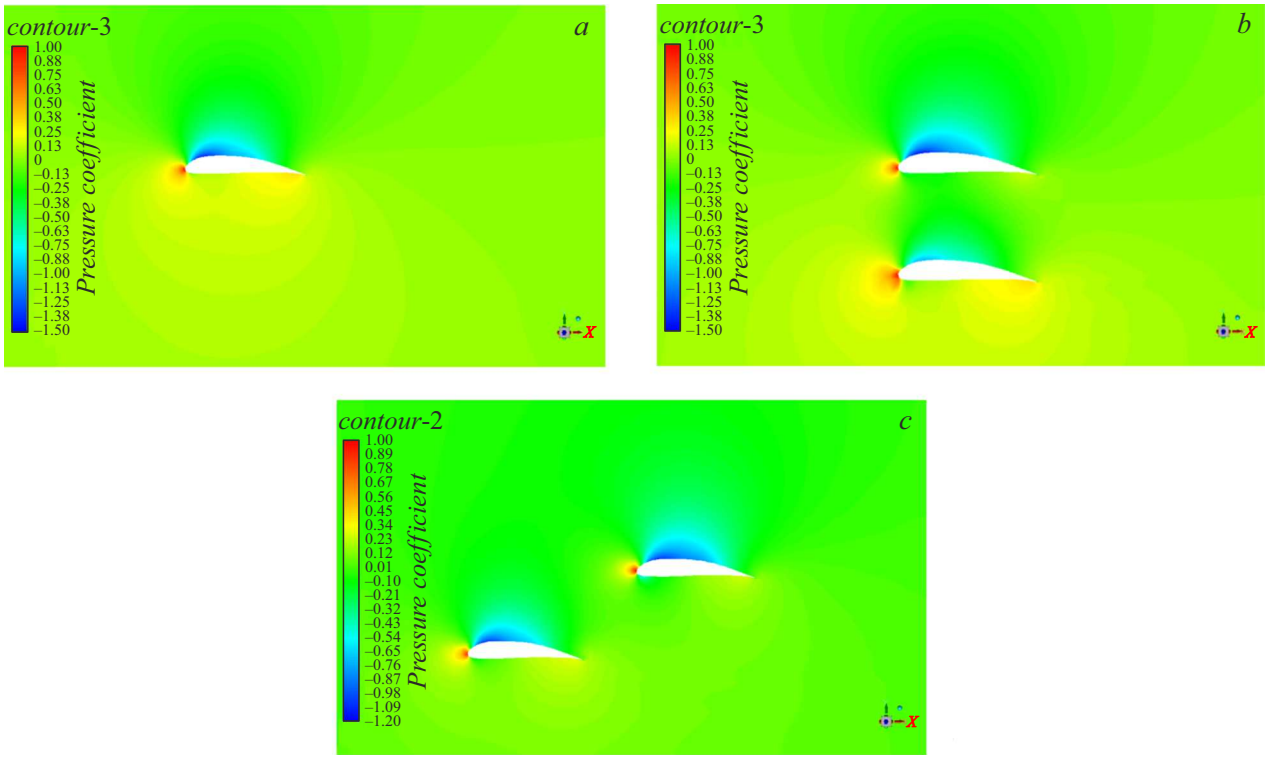


Рис. 3. Распределение коэффициента давления в сечении крыла плоскостью XOY, $z = 1.05$ m: *a* — моноплан, *b* — биплан, *c* — тандем.

По сравнению с монопланом биплан обладает более жесткой конструкцией с точки зрения прочности и при этом меньшим весом. Но в качестве самолета на солнечной энергии биплан не подходит из-за затенения одного крыла другим.

Тандемная схема расположения крыльев по сравнению с монопланом позволяет увеличить суммарную площадь несущих поверхностей и избежать при этом серьезных проблем с прочностью. Но из-за сильного разброса массовой нагрузки по продольной оси ухудшается управляемость тандемного самолета по тангажу.

В результате численных исследований показано, что в перспективе наиболее целесообразной компоновкой в качестве самолета на солнечных панелях представляется компоновка типа „тандем“ с оптимизированным размахом и взаимным расположением крыльев.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Н.К. Лисейцев, А.А. Самойловский. Электронный журнал „Труды МАИ“, **55**, 14 (2012). URL: https://mai.ru/upload/iblock/bd2/sovremennoe-sostoyanie_-problemy-i-perspektivy-razvitiya-samoletov_-ispolzuyushchikh-solnechnuyu-energiyu-dlya-poleta.pdf

[2] И.Ю. Белоусов, О.Н. Виноградов, А.В. Корнушенко, О.В. Павленко, Тханг Нгок Чинь. *Аэродинамические особенности обтекания крыла с солнечными панелями.* Междунар. научная конф. по механике („Десятые Поляховские чтения“, 23–27 сентября 2024 г. СПб., Сборнике тезисов конференции), с. 283–287.

[3] Ш.И. Шабанов. *Исследование возможностей использования солнечной энергии в авиации.* XXX Всероссийская научно-практическая конф. (Сборник трудов конференции, 2023), с. 158–160.

[4] О.В. Павленко, Е.А. Пигусов, Айшвария Сантош, Тханг Нгок Чинь. ЖТФ, **94** (12), 2099 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59271.388-24