

Как уменьшить сопротивление профиля при нулевой подъемной силе?

Совершая вертикальный старт, крыло модели планера F-1-A балансируется на угле атаки, соответствующем нулевому значению подъемной силы. Именно при этом будет обеспечиваться вертикальность траектории без заброса модели вперед или назад. Соответственно, чем меньше при этом сопротивление, тем выше будет старт. Рассмотрим на частном примере профиля, как можно уменьшить сопротивление. В качестве исходного профиля выберем профиль ПАО-163¹ (рис. 1).

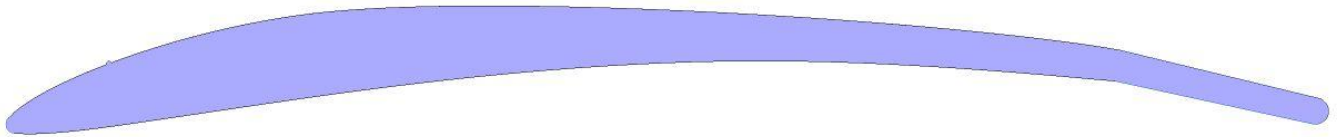


Рис. 1. Профиль ПАО-163.

Данный профиль специально проектировался автором статьи для обеспечения наибольшего времени планирования. Профиль имеет достаточно толстую заднюю часть. Это связано с тем, что предполагается использовать закрылок на крыле и, для обеспечения жесткости закрылка, задняя часть специально утолщалась.

Расчеты проводились численно по модели турбулентности Лантри-Ментера с учетом гамма-тетта перехода. Степень турбулентности потока 5%. Рассматривалось плоское обтекание профиля. Хорда профиля – 131 мм, толщина первого слоя призматических пристеночных слоев – 0,02мм.

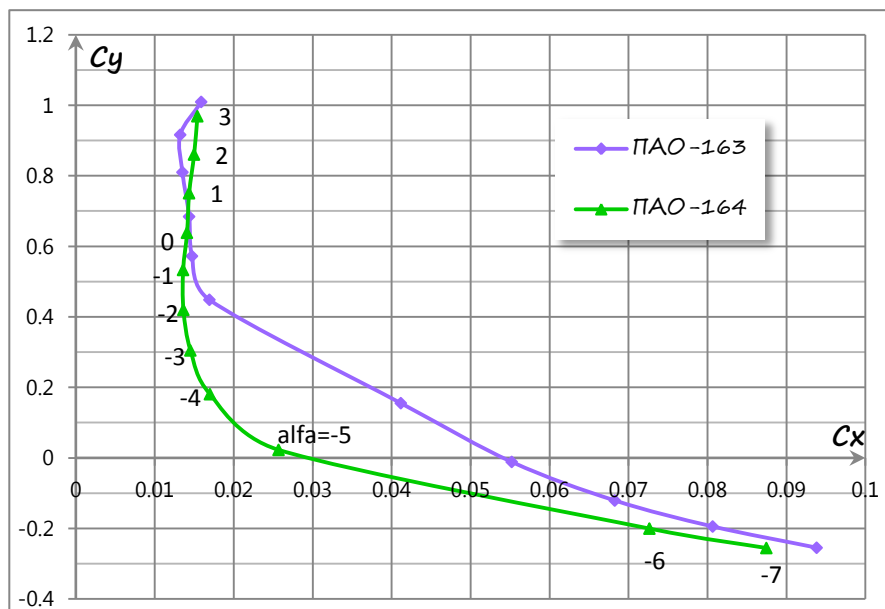


Рис. 2. Поляры профилей ($Re=380000$).

Геометрия профиля оптимизировалась при обтекании на числе Рейнольдса 50000 следующим образом. Вычислялось обтекание профиля на углах атаки 5°, 6° и 7°. К сопротивлению профиля добавлялось индуктивное сопротивление, вычисленное по приближенной формуле в зависимости от квадрата коэффициента подъемной силы и удлинения крыла. Затем для каждого угла атаки вычислялся коэффициент мощности. Далее определялся средний коэффициент мощности, и

¹ ПАО – Профиль Арепьева Оптимизированный

вычислялась вертикальная скорость снижения. Оптимизация велась по минимизации вертикальной скорости. Из вышеизложенного ясно, что сопротивление на большой скорости при коэффициенте подъемной силы $C_y=0$ в оптимизации не участвовало. Из-за этого профиль крыла имеет большой коэффициент $C_{x0}=0.056$. На рис. 2 представлена поляра профиля для $Re=380000$ (это примерно скорость 45 м/с).

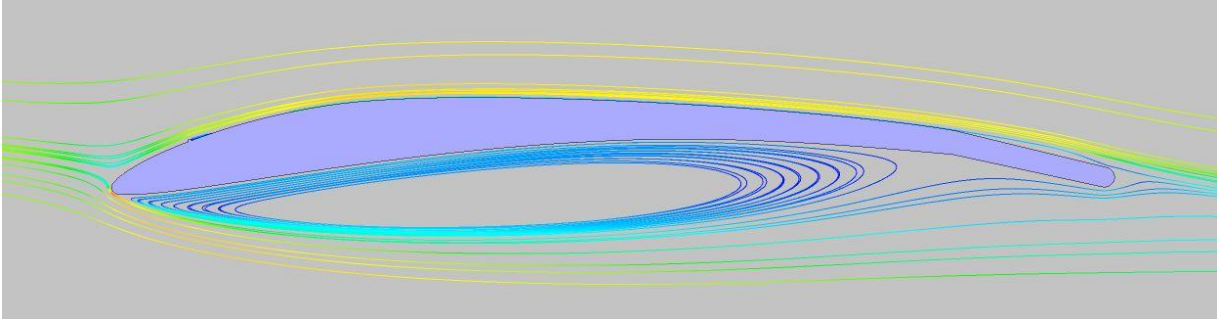


Рис. 3. Картина обтекания профиля ПАО-163 при $\alpha=-4^\circ$.

Рассмотрим картину обтекания профиля при угле атаки -4° (рис. 3). Видно, что в нижней части профиля образуется обширная зона срыва, которая и добавляет лишнего сопротивления. Поэтому при дальнейшей оптимизации необходимо изменить геометрию профиля таким образом, чтобы уменьшить эту зону. При этом надо постараться не ухудшить характеристики планирования. В данном случае можно пойти по двум направлениям. Либо уменьшить вогнутость профиля, либо увеличить толщину передней нижней части профиля, возможно с одновременным увеличением максимальной толщины профиля. Первый подход менее привлекателен, т.к. уменьшение вогнутости нижней поверхности приведет к заметному падению C_y на режиме планирования. Во втором случае возможно увеличение сопротивления, но, так как при низких числах Re для режима планирования основной вклад в сопротивление вносит обтекание верхней поверхности, то в данном случае можно попробовать этот подход.

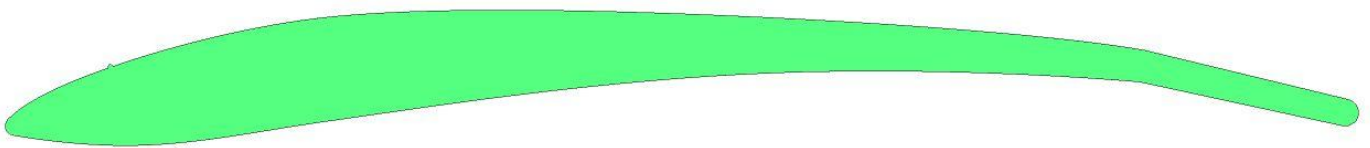


Рис. 4. Профиль ПАО-164.

В итоге был спроектирован профиль ПАО-164 (рис. 4), который имеет существенно более низкий $C_{x0}=0.03$ при высокой скорости. Поляра профиля также представлена на рис. 2. Таким образом, модифицируя всего лишь нижнюю переднюю часть профиля, удалось снизить сопротивление почти в 1.8 раза. На рис. 5 представлена картина обтекания вблизи профиля при угле атаки -5° . Видно, что зона срыва на нижней поверхности профиля практически полностью исчезла. То есть можно сделать вывод, что возможное увеличение сопротивления за счет увеличения толщины профиля с лихвой компенсировалось исчезновением срывного пузыря.

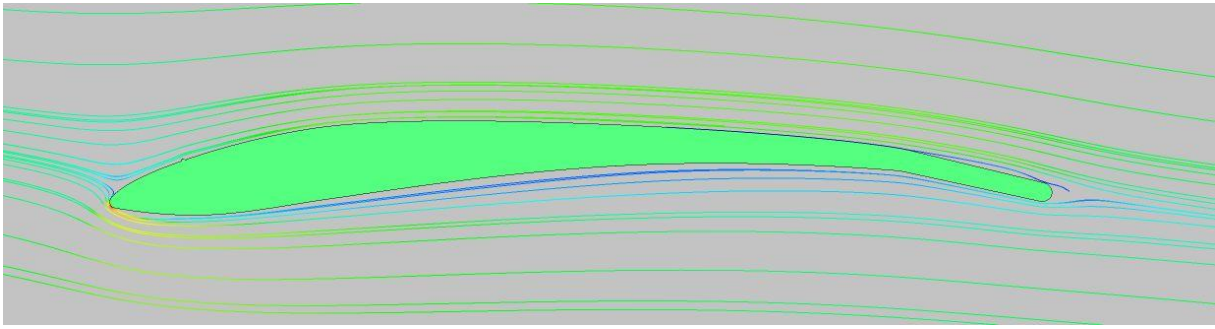


Рис. 5. Картина обтекания профиля ПАО-164 при $\alpha = -5^\circ$.

Полученный коэффициент $C_{x0}=0.03$ не является лучшим показателем – многие LDA-профили имеют этот коэффициент равный 0,02 и даже меньше. Тем не менее, так как планируется использовать закрылок, то для первого приближения полученные параметры вполне подходят.

При этом стоит обратить внимание, что у профиля ПАО-163 угол атаки нулевой подъемной силы составляет -4.0° , а у профиля ПАО-164 – -5.1° , то есть несколько меньше. Эта зависимость прослеживалась и при оптимизации других профилей: если оптимизируется профиль по двум критериям – максимального качества и минимального коэффициента C_{x0} , то нулевая подъемная сила будет достигаться при более отрицательном угле атаки.

И еще один момент. На поляре на рис. 2 видно, что при угле атаки -6° сопротивление профиля ПАО-164 существенно возрастает. Это связано с тем, что на нижней поверхности все-таки образуется зона срыва. Получается, что обтекание вблизи нулевой подъемной силы является не совсем устойчивым. Всего небольшое отклонение в угле атаки и сопротивление резко увеличивается. Таким образом, при проектировании профиля необходимо стараться точку резкого увеличения сопротивления переносить в область отрицательных C_y .

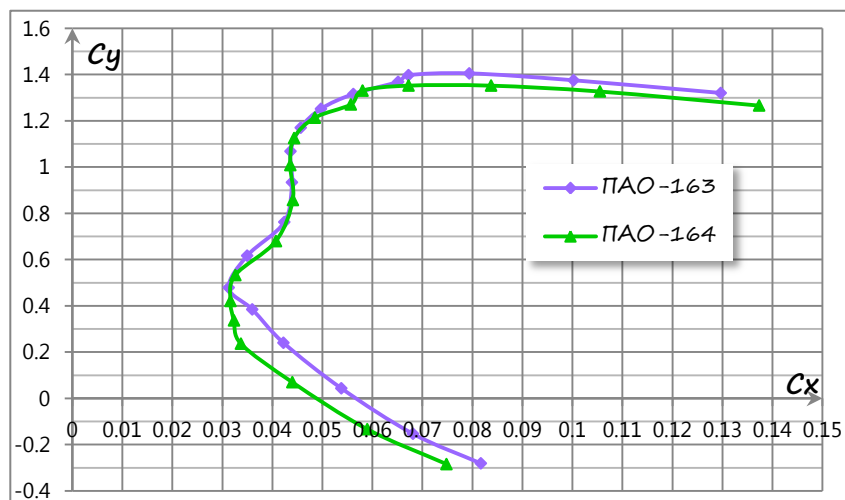


Рис. 6. Поляры профилей ($Re=40000$)

При этом профиль ПАО-164 сохранил хорошие планирующие свойства – на рис. 6 представлены поляры профилей ПАО-163 и ПАО-164 при числе $Re=40000$. Видно, что вблизи наивыгоднейших углов атаки кривые лежат рядом. Максимальный коэффициент мощности уменьшился всего лишь на 1%.

Также полученный новый профиль ПАО-164 имеет бóльшую относительную толщину $\bar{c}=7,6\%$ по сравнению с профилем ПАО-163 $\bar{c}=6,2\%$. Большая толщина позволит сделать более жесткое крыло, что для планера F-1-A вполне актуально. Оба представленных профиля можно также рекомендовать для резиномоторных моделей F-1-B, где значимость параметра C_{x0} не так велика.

Кирилл Ареньев.