

03

## Управление обтеканием полукругового профиля под нулевым углом атаки при отсосе в одной и двух вихревых ячейках для достижения экстремальной подъемной силы

© С.А. Исаев<sup>1,2</sup>, П.А. Баранов<sup>2</sup>, А.Г. Судаков<sup>2</sup>,  
И.А. Попов<sup>1</sup>, А.Е. Усачов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–Казанский авиационный институт

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

<sup>3</sup> Московский комплекс ЦАГИ  
E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступило в Редакцию 10 июля 2017 г.

На основе расчетов с помощью многоблочных вычислительных технологий и модифицированной с учетом влияния кривизны линий тока модели переноса сдвиговых напряжений турбулентного обтекания полукругового профиля под нулевым углом атаки с расположенными на контуре одной и двумя вихревыми ячейками со щелевым отсосом обнаружены стабилизация близкого к безотрывному течению и достижение экстремального коэффициента подъемной силы  $C_y = 5.2$  и аэродинамического качества  $K = 24$  профиля с учетом энергетических потерь на отсос в ячейках.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.24.45341.16961

Интерес к толстым профилям связан с созданием большой подъемной силы при их безотрывном обтекании. Однако за толстым профилем с гладким контуром даже при нулевом угле атаки образуется вихревая дорожка (как за круговым цилиндром) [1]. Шукиным предложена система управления течением, позволяющая организовать близкое к безотрывному обтекание летательного аппарата (ЛА) ЭКИП (сокр. от „экология“ и „прогресс“) [2]. Профиль ЛА ЭКИП толщиной 37.5% хорды составлен из дуг окружности и отрезков прямых линий. Для

создания близкого к безотрывному обтекания профиля на тыльной стороне контура профиля размещаются четыре малоразмерные каверны эллиптической формы. В кавернах располагаются эллиптические центральные тела, с поверхности которых осуществляется отсос воздуха в двигательную установку. Каверны играют роль воздухозаборников, и поэтому в патенте [2] не учитывается влияние коэффициента расхода отсасываемого воздуха на аэродинамическое качество аппарата. В численных исследованиях толстого профиля аппарата ЭКИП [1], выполненных на основе решения с использованием многоблочных технологий осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса при их замыкании с помощью модели переноса сдвиговых напряжений (1993 г.), установлено, что в кавернах при распределенном отсосе возникают интенсивные циркулирующие потоки со скоростями, сравнимыми со скоростью набегающего потока. Управление обтеканием толстого профиля с вихревыми ячейками при коэффициенте суммарного отсоса воздуха порядка 0.04 при высоких (свыше  $10^5$ ) числах Рейнольдса позволяет получить коэффициент подъемной силы  $C_y$  порядка 2.3 и аэродинамическое качество  $K$  порядка 20 с учетом энергетических затрат на отсос в ячейках. В [3] показано, что щелевой отсос из эллиптических вихревых ячеек позволяет уменьшить лобовое сопротивление профиля ЛА ЭКИП и увеличить его аэродинамическое качество. Круговые формы малогабаритных вихревых ячеек со щелевым отсосом анализируются в [4,5] для толстых профилей классической формы.

Полукруговой профиль привлек внимание ультранизким коэффициентом подъемной силы ( $C_y$  порядка  $-1$ ) при нулевом угле атаки [3,6,7]. Улучшить аэродинамические характеристики профиля удастся расположением в его контуре малогабаритной (с радиусом, равным 0.1 хорды) круговой вихревой ячейки со щелевым отсосом для малого угла атаки и нулевого угла атаки при наличии отводящего тракта с выбросом воздуха в ближний след, когда возникает автоколебательный режим обтекания профиля с формированием вихревой дорожки.

В настоящей работе решается задача кардинального увеличения  $C_y$  при высоком аэродинамическом качестве за счет варьирования местоположения одной и двух вихревых круговых ячеек на контуре полукругового профиля. Среднемассовая скорость щелевого отсоса фиксируется и равна скорости набегающего потока.

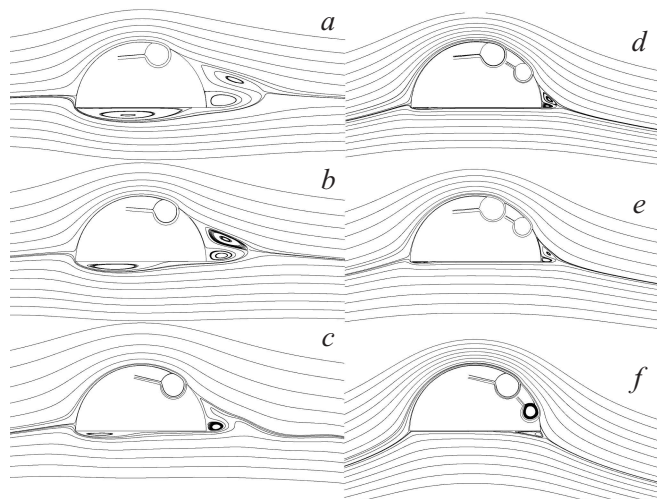
Рассматривается полукруговой профиль с радиусами скругления кромок 0.002 в равномерном низкоскоростном потоке воздуха при числе

Рейнольдса  $Re = 5 \cdot 10^4$  под нулевым углом атаки. Скорость потока и длина хорды выбраны в качестве масштабов обезразмеривания. Начало системы декартовых координат  $x, y$  располагается в середине основания профиля.

Первая вихревая ячейка круговой формы с радиусом 0.1 располагается в контуре верхней дужки профиля с заглублиением центра ячейки в долях радиуса ячейки, равным 0.707. Положение середины окна в долях длины контура верхней дужки  $s_1$  составляет 0.6, 0.65 и 0.7 от передней кромки профиля. Вторая ячейка имеет радиус 0.075, а положение середины окна  $s_2$  принимает значения 0.8, 0.85 и 0.9. Ширина щелевого отводящего канала 0.25 в долях радиуса каждой ячейки. Его положение на внутреннем контуре между кромками ячейки — 0.25 от длины контура ячейки. Среднемассовая скорость отсасываемого воздуха равна единице, а коэффициенты расхода — 0.025 и 0.01875 для первой и второй вихревых ячеек соответственно.

Система нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса для несжимаемой вязкой жидкости, замкнутых с помощью модифицированной с учетом влияния кривизны линий тока модели переноса сдвиговых напряжений, решается конечно-объемным факторизованным методом с помощью многоблочных вычислительных технологий, основанных на пересекающихся разномасштабных сетках [1,3]. Расчет нестационарного обтекания толстого профиля завершается при выходе на автоколебательный режим с периодическим изменением локальных и интегральных характеристик во времени.

Прямоугольная расчетная область простирается примерно на 62 (все размеры отнесены к хорде профиля) в продольном направлении и на 33 в вертикальном. Начало системы координат  $x, y$  располагается на расстоянии 11 от входной границы симметрично относительно верхней и нижней границ. На входной границе задаются фиксированные условия для равномерного потока и характеристик турбулентности. Степень турбулентности выбирается из условия соответствия экспериментам [6] и равняется 1%. Величина вихревой вязкости на входе имеет порядок  $1/Re$ . На остальных границах задаются мягкие граничные условия (условия продолжения решения на границу). Расчетная область разбивается неравномерной сеткой с количеством ячеек  $214 \times 98$  с минимальными шагами, равными 0.1. Для отображения характеристик нестационарного вихревого следа за профилем он покрывается довольно подробной сеткой с минимальными шагами 0.05, содержащей



Влияние количества и расположения вихревых ячеек на полукруговом профиле на структуру осредненного по времени отрывного обтекания. *a* —  $s_1 = 0.6$ ; *b* —  $s_1 = 0.65$ ; *c* —  $s_1 = 0.7$ ; *d* —  $s_1 = 0.6, s_2 = 0.8$ ; *e* —  $s_1 = 0.65, s_2 = 0.85$ ; *f* —  $s_1 = 0.7, s_2 = 0.9$ .

$164 \times 62$  ячеек, в прямоугольной области длиной 11.4 и шириной 3.2. Начало координат располагается на расстоянии 1.4 от передней границы зоны. Профиль окружает  $O$ -сетка в подобласти шириной 0.5, содержащая  $272 \times 64$  ячеек со сгущением к поверхности профиля. Пристеночный шаг равен  $10^{-4}$ . Также вводится группа сеток в районе и внутри каждой вихревой ячейки, а также отводящего канала. Общее число расчетных ячеек составляет величину порядка 90 тысяч.

Временной шаг выбирается равным 0.01. Расчеты выполняются по схеме второго порядка точности. Количество итерационных шагов в блоке коррекции давления 20.

На рисунке сравниваются картины осредненного во времени обтекания полукругового профиля с одной и двумя вихревыми ячейками, а в таблице анализируются осредненные по времени коэффициенты суммарного лобового сопротивления  $G_{x\,sum}$ , подъемной силы  $C_y$ , дополнительного сопротивления, связанного с энергетическими затратами  $C_{x\,add}$  [1,3] и аэродинамическое качество  $K = C_y / C_{x\,sum}$ .

Влияние количества и расположения вихревых ячеек на полукруговом профиле на осредненные по времени интегральные аэродинамические характеристики профиля

	$C_y$	$C_{x\ sum}$	$C_{x\ add}$	$K$
$s_1 = 0.6$	0.821	0.225	0.071	3.65
$s_1 = 0.65$	1.459	0.177	0.077	8.27
$s_1 = 0.7$	2.214	0.149	0.084	14.85
$s_1 = 0.6, s_2 = 0.8$	3.36	0.26	0.166	16.4
$s_1 = 0.65, s_2 = 0.85$	4.16	0.206	0.172	20.2
$s_1 = 0.7, s_2 = 0.9$	5.17	0.214	0.176	24.0

Как видно из рисунка, размещение одной вихревой ячейки на контуре не позволяет избежать отрывного характера обтекания толстого профиля. Однако по мере перемещения ячейки к задней кромке размеры присоединенного к передней кромке на нижней стенке профиля вихря и крупномасштабного вихря на тыльной стороне профиля уменьшаются, а коэффициент подъемной силы и аэродинамическое качество растут, суммарное лобовое сопротивление существенно (на 30%) уменьшается, причем дополнительное сопротивление, связанное с энергетическими затратами на отсос, изменяется незначительно.

Пара малогабаритных вихревых ячеек способствует кардинальной перестройке отрывного течения около полукругового профиля. Обтекание профиля стабилизируется. Отрывные зоны оказываются крайне незначительными, а в случае смещения ячеек к задней кромке профиля вихрь в окрестности передней кромки вовсе исчезает, а вихрь в районе задней кромки оказывается присоединенным к плоской нижней стенке профиля. Значение  $C_y$  полукругового профиля по мере смещения вихревых ячеек к задней кромке возрастает с 3.36 до 5.17, а аэродинамическое качество — с 16.4 до 24.  $C_{x\ add}$  растет незначительно, но составляет значительную часть (доходящую до 80%)  $C_{x\ sum}$ .

Важно отметить более чем двукратное увеличение  $C_y$  полукругового профиля с двумя круговыми вихревыми ячейками по сравнению с  $C_y$  профиля ЛА ЭКИП с четырьмя эллиптическими вихревыми ячейками при сопоставимом суммарном расходе отсасываемого воздуха.

Таким образом, двух вихревых ячеек, размещенных на контуре полукругового профиля при нулевом угле атаки, оказывается достаточно

для того, чтобы обеспечить близкое к безотрывному обтекание профиля и экстремальную величину коэффициента подъемной силы порядка 5 при коэффициенте суммарного расхода отсасываемого воздуха, равном 0.044.

Работа выполнена при государственной поддержке научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый — С. Исаев, КНИТУ–КАИ, Казань) по гранту Правительства РФ № 14.Z50.31.0003.

## Список литературы

- [1] Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А.В. Ермишина и С.А. Исаева. М.: МГУ, 2003. 360 с.
- [2] *Savitsky A.I., Schukin L.N., Karelin V.G. et al.* // Patent N 5417391. May 23, 1995; preceded by earlier Russian patent N 2015941 from 1991.
- [3] Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками. Численное и физическое моделирование / Под ред. С.А. Исаева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 214 с.
- [4] *Donelli R., Ionelli P., Chernyshenko S., Iollo A., Zannetti I.* // AIAA J. 2009. V. 47. P. 451–467.
- [5] *Isaev S., Baranov P., Popov I., Sudakov A., Usachov A.* // Acta Astronautica. 2017. V. 132. P. 204–220.
- [6] *Случановская З.П.* // Науч. тр. Ин-та механики. 1973. № 24. С. 52–60.
- [7] *Исаев С.А., Мяс Дж.Дж., Судаков А.Г., Усачов А.Е.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 15. С. 46–52.