

УДК 532.517:4

## Управление обтеканием толстого профиля с вихревой ячейкой со щелевым отсосом воздуха и выбросом в ближний след\*

С.А. Исаев, П.А. Баранов, М.Ю. Смуров, А.Г. Судаков, А.В. Шебелев

*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации*

E-mail: isaev3612@yandex.ru

Перестройка нестационарной отрывной картины низкоскоростного обтекания воздухом полукругового профиля при его нулевом угле атаки со смещением точки отрыва к задней кромке возникает при размещении на тыльной стороне профиля вихревой ячейки со щелевым отсосом и выбросом в ближний след. Диаметр ячейки составляет 0,2 хорды, а перепад давления на вентиляторе в системе отсоса равняется удвоенному скоростному напору. При этом кардинально изменяются интегральные силовые характеристики: подъемная сила из ультранизкой отрицательной становится положительной, а лобовое сопротивление уменьшается вдвое. Статическое давление падает в два–три раза на верхней дужке и повышается вдвое на нижней, причем уровень пульсаций давления понижается более, чем на порядок величины.

**Ключевые слова:** вихревая ячейка, полукруговой профиль, отсос, вентилятор, многоблочные вычислительные технологии, модифицированная MSST.

Методический интерес к полукруговому профилю вызван его аномальными характеристиками при нулевом угле атаки [1, 2]. Ультранизкая отрицательная подъемная сила профиля растет при незначительном отклонении от нулевого угла, так как его обтекание быстро перестраивается. Одновременно полукруговой профиль является примером несущей поверхности экстремальной толщины. До сих пор большое внимание уделялось профилю летательного аппарата ЭКИП (Экология и прогресс) [3] толщиной 37,5 % хорды. Фактически он, как и полукруговой профиль, имеет плоское основание, переходящее в скругления передней и задней кромок. Верхняя дужка представляет сегмент окружности. Турбулентное обтекание профиля ЭКИП является нестационарным и отрывным, причем на него при нулевом угле атаки действует отрицательная подъемная сила [4]. Размещение на тыльной стороне профиля четырех разновеликих эллиптических вихревых ячеек с поверхностным отсосом со стороны центральных тел, расположенных внутри ячеек, позволило кардинально изменить картину обтекания, стабилизировать течение, придать ему близкий к безотрывному характер и существенно улучшить аэродинамические характеристики. Получен максимальный коэффициент подъемной силы  $C_y = 2,35$ , а аэродинамическое качество при этом составляет величину порядка 20. Недавно было получено обоснование улучшений характеристик профиля ЭКИП при замене распределенного

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 14-19-00003.

отсоса на сосредоточенный щелевой. Оказалось возможным многократно увеличить его аэродинамическое качество [5].

Некоторое время назад рассматривалась упрощенная трактовка щелевого отсоса в предположении о выбросе воздуха в зону с нулевым избыточным давлением [3]. В работе [6] при анализе турбулентного обтекания кругового цилиндра с двумя вихревыми ячейками впервые была введена система отсоса с отводящими трактами и выбросом воздуха в ближний след за цилиндром через центральный канал с расположенным в нем вентилятором. Показано, что включение модели вентилятора с перепадом давления позволяет стабилизировать обтекание, устранить вихревую дорожку в следе и существенно снизить лобовое сопротивление цилиндра с учетом энергетических затрат.

В рассматриваемом случае вентилятор располагается в криволинейном отводящем канале, отсасывающем воздух из цилиндрической вихревой ячейки, размещенной на тыльной стороне полукругового профиля (рис. 1а). В работе приводится анализ перестройки вихревой структуры обтекания полукругового профиля при весьма умеренном коэффициенте отсоса, которая сопровождается кардинальным изменением интегральных и локальных характеристик обтекания. Скорость и плотность набегающего потока, а также длина хорды выбраны в качестве масштабов обезразмеривания.

Рассматривается полукруговой профиль толщиной 50 % (в долях хорды) с радиусами скругления кромок 0,002 в равномерном низкоскоростном потоке воздуха при числе Рейнольдса  $4 \cdot 10^4$  под нулевым углом атаки. Начало системы декартовых координат  $x$ ,  $y$  совпадает с серединой основания профиля.

Вихревая ячейка круговой формы радиусом 0,1 располагается в контуре верхней дужки профиля с заглублением центра ячейки, равным 0,071 (величины приведены в долях хорды). Положение середины окна ячейки в долях длины контура верхней дужки составляет 0,6, ширина щелевого канала в долях радиуса ячейки — 0,25, его положение между кромками ячейки составляет 0,25 длины контура ячейки. Вентилятор размещается на расстоянии 0,7 длины отводящего канала в районе выдува струи. Перепад давления на вентиляторе задается равным удвоенному скоростному напору.

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 [3]. В пристеночных ячейках параметры определяются в соответствии с методологией [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 72 в продольном направлении и на 42 в вертикальном, начало координатной системы  $x$ ,  $y$  располагается на расстоянии 21 от входной границы симметрично относительно верхней и нижней

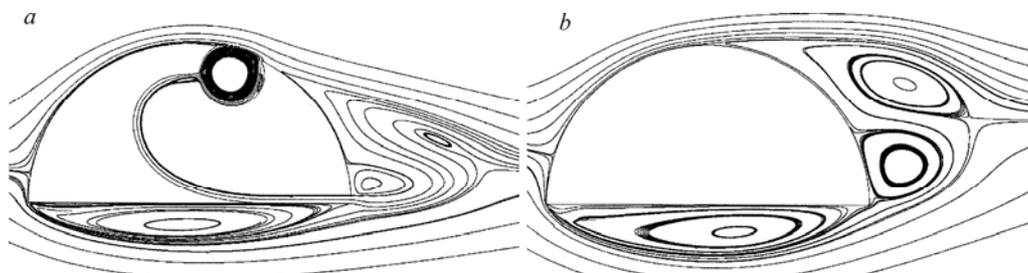


Рис. 1. Сравнение осредненных по периоду колебаний  $C_y$  картин отрывного обтекания полукругового профиля под нулевым углом атаки с вихревой ячейкой (а) и без нее (b).

границ (величины указаны в долях хорды). На входной границе задаются фиксированные условия для равномерного потока и характеристик турбулентности. Степень турбулентности выбирается из условия соответствия экспериментам [2] и равняется 1 %, масштаб турбулентности принимается равным хорде профиля аналогично [1]. На остальных границах задаются мягкие граничные условия — условия продолжения решения на границу. Расчетная область разбивается неравномерной сеткой с количеством ячеек  $340 \times 317$  с минимальными шагами, равными 0,1. Профиль для отображения характеристик нестационарного вихревого следа за ним покрывается довольно подробной сеткой прямоугольной области длиной 11,4 и шириной 4 с минимальными шагами 0,05, содержащей  $189 \times 63$  ячеек. Начало координат располагается на расстоянии 1,4 (в долях хорды) от передней границы зоны. Профиль окружает O-сетка в подобласти шириной 0,5, содержащая  $291 \times 65$  ячеек со сгущением к поверхности профиля. Пристеночный шаг равен  $10^{-4}$ . Кроме того, вводится группа сеток в районе и внутри вихревой ячейки, а также отводящего канала. Общее число расчетных ячеек составляет величину порядка 166 тысяч. Временной шаг выбирается равным 0,01. Количество итерационных шагов в блоке коррекции давления — 30. Выход на автоколебательный режим осуществляется примерно за 50 безразмерных единиц.

Некоторые из полученных результатов представлены на рис. 1–3 и в таблице. Сравнение осредненных по времени на автоколебательном режиме картин обтекания полукругового профиля при наличии и отсутствии вихревой ячейки на рис. 1 показывает

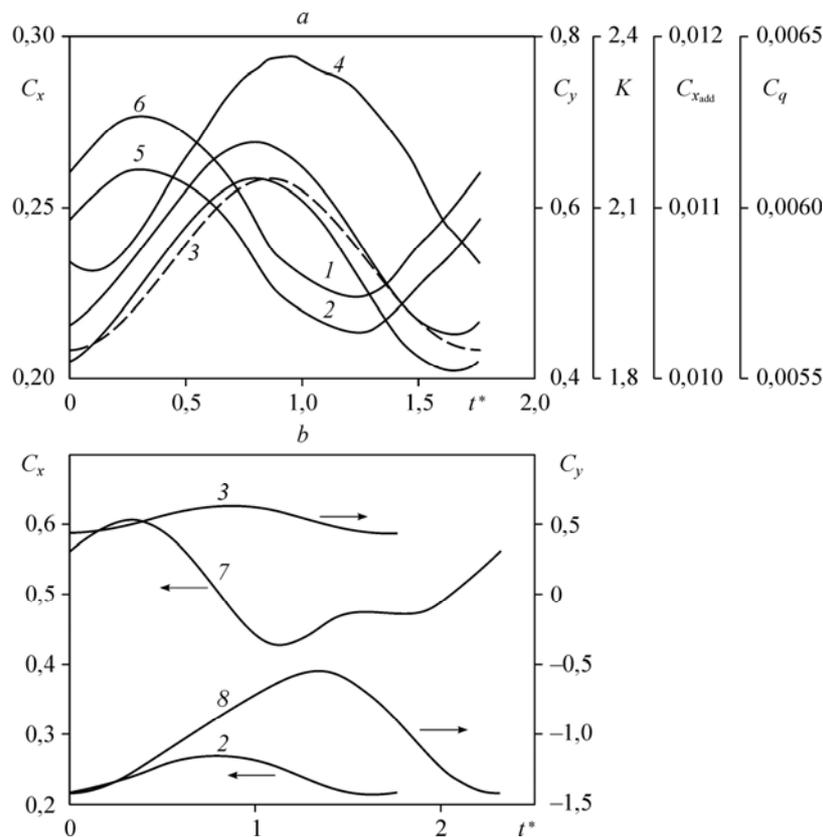


Рис. 2. Поведение на периоде колебаний  $C_y$  расчетного и суммарного коэффициентов  $C_x$  (1 и 2) и  $C_y$  (3), аэродинамического качества  $K$  (4), дополнительного сопротивления, обусловленного энергетическими затратами  $C_{xadd}$  (5), и коэффициента расхода  $C_q$  (6) (a), а также сравнение  $C_x$  и  $C_y$  для полукругового профиля с вихревой ячейкой и без нее (7 и 8) (b).

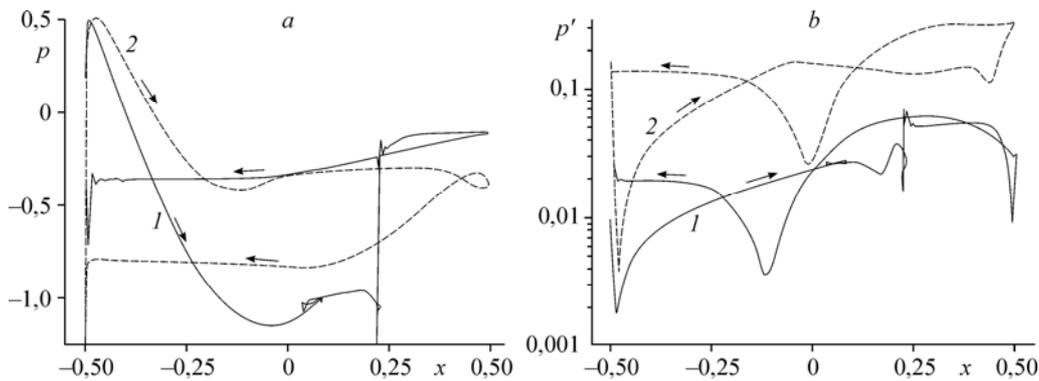


Рис. 3. Сравнение осредненных по периоду колебаний  $C_y$  распределений поверхностного статического  $p$  (а) и пульсационного  $p'$  (б) давлений вдоль хорды профиля.

1 — профиль с вихревой ячейкой, 2 — профиль без вихревой ячейки.

трансформацию структуры течения при размещении вихревой ячейки на спинке профиля. Максимальная скорость циркулирующего потока в ячейке оказывается порядка 0,7 долей скорости набегающего потока, а скорость в отводящем канале составляет 30 % от характерной скорости. На рис. 2а демонстрируется поведение коэффициентов расчетного (полученного из решения исходной системы уравнений) и суммарного (с учетом энергетических затрат) лобового сопротивления, подъемной силы и аэродинамического качества, а также дополнительного, обусловленного энергетическими затратами сопротивления и коэффициента расхода на периоде колебаний  $C_y$ , где  $t^*$  — приведенное к началу периода время. На рис. 2б сравниваются  $C_x$  и  $C_y$  для полукругового профиля в присутствии и без вихревой ячейки. Распределения осредненного и пульсационного давления вдоль хорды полукругового профиля представлены на рис. 3, для их оценки используется методология [7].

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Перестройка нестационарной отрывной картины низкоскоростного обтекания воздухом полукругового профиля при нулевом угле атаки со смещением точки отрыва к задней кромке возникает при размещении на тыльной стороне профиля вихревой ячейки со щелевым отсосом и выбросом в ближний след. Диаметр ячейки составляет 0,2 хорды, а перепад давления на вентиляторе в системе отсоса равняется удвоенному скоростному напору. При этом увеличивается частота вихреобразования, а число Струхала растет с 0,43 до 0,57 (см. табл.).

Таблица

Сравнение осредненных по периоду колебаний  $C_y$  интегральных характеристик обтекания полукругового профиля с вихревой ячейкой и без нее

Конфигурации	Полукруговой профиль		Полукруговой профиль с вихревой ячейкой
	Эксперимент [2]	Расчет	Расчет
$\overline{C_x}$	0,5	0,49	0,24
$\overline{C_y}$	-1,1	-1,0	0,53
$K$	-2,2	-2,04	2,22
$\overline{C_{xadd}}$	—	—	0,01
$\overline{C_q}$	—	—	0,006
St	—	0,433	0,568

2. Кардинально изменяются интегральные силовые нагрузки. Для полукругового профиля под нулевым углом атаки характерна экстремальная ультранизкая отрицательная подъемная сила ( $C_y$ , порядка  $-1$ ). При размещении вихревой ячейки подъемная сила  $C_y$  становится положительной  $\sim 0,5$ . Лобовое сопротивление при этом снижается вдвое.

3. Коэффициент расхода  $C_q$  отсасываемого воздуха является довольно умеренным и равен 0,006, при этом дополнительное, вызванное энергетическими затратами лобовое сопротивление составляет не более 4 % от суммарного.

4. Асимметричный характер поведения  $C_x$  и  $C_y$  на периоде колебаний, присущий полукруговому профилю, меняется на близкий к синусоидальному.

5. Размещение вихревой ячейки на полукруговом профиле приводит к кардинальной перестройке распределения локальной нагрузки на его контуре. На верхней дужке статическое давление до вихревой ячейки уменьшается в два–три раза, но за ней уровень давления становится выше, чем для гладкого профиля. На основании профиля — нижней дужке — статическое давление увеличивается вдвое при размещении вихревой ячейки. В результате отрицательная подъемная сила меняет знак на положительную.

6. Уровень пульсаций давления при размещении вихревой ячейки более чем на порядок ниже по сравнению с обтеканием гладкого профиля.

### Обозначения

Re, St — числа Рейнольдса и Струхала,  
 $U$  — скорость набегающего потока, м/с,  
 $L$  — хорда профиля, м,  
 $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>,  
 $\mu$  — вязкость, кг/(м·с),  
 $t$  — время, в долях  $L/U$ ,  
 $s$  — отложенная по контуру цилиндра от передней критической точки координата, в долях периметра,  
 $u, v$  — декартовы составляющие скорости, в долях  $U$ ,  
 $C_q$  — коэффициент массового расхода отсасываемого воздуха, в долях  $U \cdot L$ ,

$C_x, C_{xadd}, C_{xsum}$  — коэффициенты расчетного (полученного из решения исходных уравнений), дополнительного и суммарного сопротивлений,  
 $C_y$  — коэффициент подъемной силы,  
 $K$  — аэродинамическое качество,  $C_{xsum}/C_y$ ,  
 $p$  — статическое давление на стенке, в долях удвоенного скоростного напора  $\rho \cdot U^2$ ,  
 $'$  — пульсационные величины,  
 $-$  — осредненная величина параметра  $F$  по периоду колебаний  $C_y$ .

### Список литературы

1. Исаев С.А., Мясун Дж.Дж., Судаков А.Г., Усачёв А.Е. Анализ экстремального поведения подъемной силы полукругового профиля при турбулентном обтекании в окрестности нулевого угла атаки // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 15. С. 46–52.
2. Случановская З.П. Распределение давления на поверхности прямоугольного, трехгранного и полукруглого цилиндров и их аэродинамические коэффициенты. М.: Изд-во МГУ, 1973. № 24. С. 52–60.
3. Баранов П.А., Гувернюк С.В., Ермишин А.В., Зубин М.А. и др. 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.
4. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Пышный И.А., Харченко В.Б. Численное моделирование нестационарного турбулентного обтекания толстого профиля с вихревыми ячейками при включении отсоса с поверхности центральных тел // Аэромеханика и газовая динамика. 2002. № 3. С. 3–15.
5. Исаев С.А., Баранов П.А., Судаков А.Г., Ермаков А.М. Моделирование эффекта повышения аэродинамического качества 37,5 %-го толстого профиля со щелевым отсосом с учетом влияния сжимаемости // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 2. С. 49–57.
6. Исаев А.С., Баранов П.А., Ватин Н.И., Жукова Ю.В., Судаков А.Г. Подавление дорожки Кармана и снижение лобового сопротивления кругового цилиндра с двумя вихревыми ячейками // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 15. С. 50–57.
7. Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике // Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 316 с.

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2015 г.,  
 после доработки — 20 января 2016 г.