

03

## **Оценка времени существования уловленного вихря в круговой каверне на обтекаемом при нулевом угле атаки полукруговом профиле после отключения щелевого отсоса**

© 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, Москва  
E-mail: isaev3612@yandex.ru

*Поступило в Редакцию 24 ноября 2016 г.*

Выполнен расчет перестройки периодической структуры турбулентного обтекания полукругового профиля под нулевым углом атаки при отключении системы щелевого отсоса воздуха из круговой каверны. Используются многоблочные вычислительные технологии решения осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье–Стокса с замыканием по модифицированной с учетом кривизны линий тока модели переноса сдвиговых напряжений. Оценено время существования уловленного вихря в круговой каверне.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.07.44466.16578

Одной из перспективных концепций создания летательных аппаратов с высокими аэродинамическими характеристиками является управление обтеканием толстых тел, в том числе несущих поверхностей вихревыми ячейками. Ячейка представляет собой каверну на тыльной стороне омываемого контура тела, причем циркуляционное течение в уловленном вихре интенсифицируется одним из энергозатратных способов: распределенным (со стороны центрального тела) и сосредоточенным (щелевым) отсосом или вращением цилиндрического центрального тела [1]. Система из четырех малоразмерных эллипти-

ческих вихревых ячеек на контуре, состоящем из дуг окружностей, соединенных отрезком прямой линии, и имеющем толщину 37.5%, применяется в летательном аппарате ЭКИП [2] и позволяет обеспечить практически безотрывное обтекание толстого профиля с высоким аэродинамическим качеством (порядка 20) и коэффициентом подъемной силы (порядка 2.5) [1]. В [3] предложена рациональная форма вихревой ячейки, близкая к круговой.

В последнее время наметился интерес к классической форме толстой несущей поверхности в виде полукругового профиля. Обнаруженный экспериментально в [4] эффект ультранизкой подъемной силы ( $C_y = -1.1$ ) такого профиля при нулевом угле атаки объясняется численно в [5] на основе анализа перестройки вихревых картин течения. В [6,7] турбулентное обтекание полукругового профиля рассматривается в качестве тестовой задачи для верификации модифицированной модели переноса сдвиговых напряжений с учетом влияния кривизны линий тока, тестирования расчетных сеток, алгоритмов и пакетов прикладных программ.

Система щелевого отсоса из вихревой ячейки с включением вентилятора в отводящем канале и выбросом струи в ближний след впервые предложена для стабилизации следа за круговым цилиндром в [8] и позволяет кардинально улучшить аэродинамические характеристики полукругового профиля, увеличивая его аэродинамическое качество от отрицательных величин до значений порядка 10 [9].

В данном исследовании внимание концентрируется на оценке времени существования уловленного вихря в круговой каверне на полукруговом профиле под нулевым углом атаки при отключении вентилятора. Этот параметр важен для конструирования системы управления расходом отсасываемого воздуха.

Рассматривается полукруговой профиль с радиусами скругления кромок 0.002 в равномерном низкоскоростном потоке воздуха при числе Рейнольдса  $5 \cdot 10^4$  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.

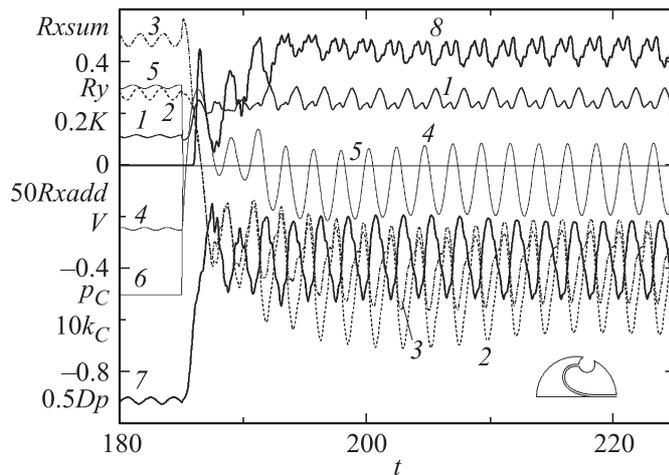
Вихревая ячейка круговой формы с радиусом 0.1 располагается в контуре верхней дужки профиля с заглублением центра ячейки в долях радиуса ячейки, равном  $-0.707$ . Положение середины окна в долях длины контура верхней дужки 0.6, ширина щелевого канала 0.25 в

долях радиуса ячейки. Его положение на внутреннем контуре между кромками ячейки 0.25 от длины контура ячейки. Вентилятор размещается на расстоянии 0.7 длины отводящего канала в районе выдува струи. Перепад давления на вентиляторе на начальном периодическом режиме обтекания профиля 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 [10]. 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 границ. На входной границе задаются фиксированные условия для равномерного потока и характеристик турбулентности. Степень турбулентности выбирается из условия соответствия экспериментам [3] 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  $340 \times 317$  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  $189 \times 63$  ячеек, в прямоугольной области длиной 11.4 и шириной 4. Начало координат располагается на расстоянии 1.4 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  $10^{-4}$ . Вводится группа сеток в районе и внутри вихревой ячейки, а также отводящего канала. Общее число расчетных ячеек составляет величину порядка 166 тысяч.

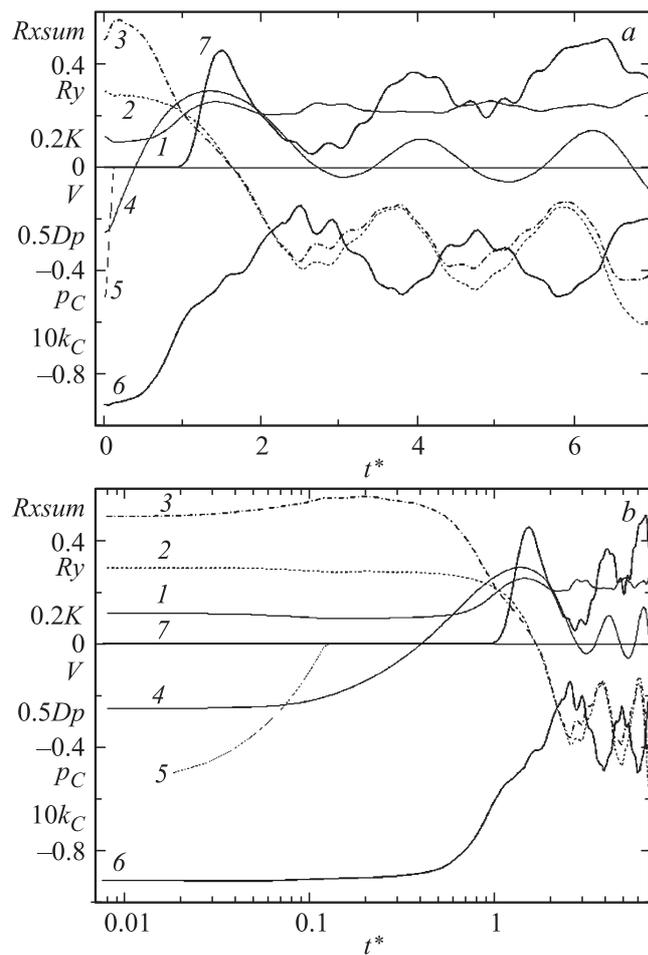
Временной шаг выбирается равным 0.01. Расчеты выполняются по схеме второго порядка точности. Количество итерационных шагов в блоке коррекции давления 30.



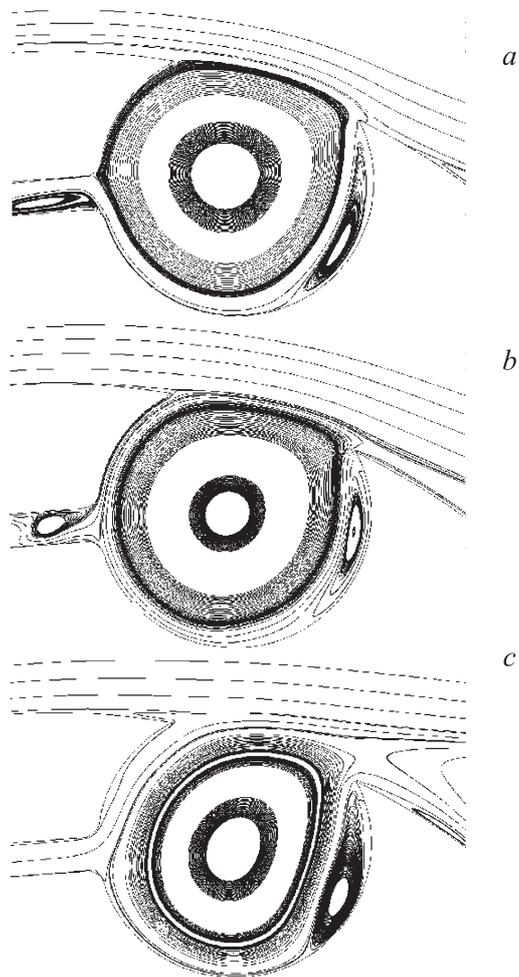
**Рис. 1.** Зависимости интегральных и локальных характеристик обтекания полукругового профиля от времени  $t$ : 1 —  $Rxsum$ , 2 —  $Ry$ , 3 —  $0.2K$ , 4 —  $V$ , 5 —  $50Rxadd$ , 6 —  $0.5Dp$ , 7 —  $p_C$ , 8 —  $10k_C$ .

На рис. 1–3 представлены некоторые из полученных результатов. Перестройка нестационарной картины обтекания полукругового профиля при отключении вентилятора в отводящем канале сопровождается резким изменением интегральных и локальных параметров потока и характеристик турбулентности во времени  $t$ . Анализируются отнесенные к удвоенному скоростному напору величины суммарного лобового сопротивления  $Rxsum$ , подъемной силы  $Ry$ , дополнительного сопротивления, связанного с энергетическими потерями  $Rxadd$  [9], аэродинамическое качество  $K = Ry/Rxsum$ , среднемассовая скорость в отводящем канале  $V$ , давление  $p_C$  и энергия турбулентности  $k_C$  в центре вихревой ячейки. Также показано изменение перепада давления на вентиляторе  $Dp$ , который уменьшается от 1 до 0 на периоде времени порядка 0.08. После отключения вентилятора  $Dp = Rxadd = 0$ .

Отключение вентилятора приводит к увеличению давления в камере, к турбулизации отрывного течения в ней, к развитию колебаний потока в отводящем тракте, когда фазы всасывания воздуха из ближнего следа чередуются с фазами истечения воздуха в район задней кромки



**Рис. 2.** Зависимости интегральных и локальных характеристик обтекания полукругового профиля для переходного процесса в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабе изменения времени  $t^*$ : 1 —  $Rxsum$ , 2 —  $Ry$ , 3 —  $0.2K$ , 4 —  $V$ , 5 —  $0.5Dp$ , 6 —  $p_C$ , 7 —  $10k_C$ .



**Рис. 3.** Вихревые структуры в круговой ячейке в моменты времени  $t = 180$  (*a*), 180.5 (*b*), 186 (*c*).

(рис. 1).  $Rx_{sum}$  увеличивается в два-три раза, причем волнообразный, близкий к синусоидальному характер поведения меняется на двугорбый [7].  $Ry$  и  $K$  становятся отрицательными. Выход на автоколебательный режим обтекания профиля осуществляется примерно за 40 безразмерных единиц после отключения вентилятора в момент  $t = 185.1$ .

Циркулирующий в каверне поток воздуха в уловленном вихре при  $Dp = 1$  обладает высокой интенсивностью с местными скоростями, сопоставимыми со скоростью невозмущенного потока, и закручен по часовой стрелке. Давление в центре исключительно низкое (порядка  $-0.9$ ), а энергия турбулентности близка к нулю, т.е. ядро вихря практически невязкое. Величина среднемассовой скорости отсоса составляет величину порядка 0.25. На рис. 2 показаны зависимости характеристик на переходном временном участке  $t^* = t - 185$ , практически от момента отключения вентилятора, а на рис. 3 демонстрируются картины течения в каверне в моменты времени, когда еще существует интенсивный уловленный вихрь.

Внимание акцентируется на поведении зависимостей на рис. 2, *b*, построенных в логарифмическом масштабе, и на перестройке вихревой структуры в каверне, сопровождающейся перемещением точки отрыва за каверной. Очевидна взаимосвязь между ними, т.е. интегральные характеристики обтекания профиля на начальном участке меняются незначительно, пока в каверне сохраняется интенсивный уловленный вихрь. Далее, вихрь начинает деформироваться, постепенно ослабевая и уменьшаясь в размерах. Кроме того, он совершает колебания в каверне, которым соответствуют осцилляции интегральных нагрузок и локальных характеристик в центре каверны. Особо следует отметить, что на начальном участке  $k_C$  в центре каверны практически отсутствует.

Таким образом, время существования уловленного вихря, при котором сохраняются высокие аэродинамические характеристики толстого профиля, составляет величину порядка 0.8, а его полное время жизни до исчезновения в каверне составляет 5–7.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по проекту № 14-19-00003 и при частичной государственной поддержке научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах (ведущий ученый — С. Исаев, КНИТУ-КАИ, г. 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.
- [2] *Savitski A.I., Schukin L.N., Karelin V.G.* et al. // United States Patent No. 5417391. May 23, 1995. (Preceded by earlier Russian patent No. 2015941 from 1991).
- [3] *Donelli R., Ionelli P., Chernyshenko S.* et al. // AIAA J. 2009. V. 47. P. 451–467.
- [4] *Случановская З.П.* // Научные труды Института механики. 1973. № 24. С. 52–60.
- [5] *Исаев С.А., Мяс Дж.Дж., Судаков А.Г., Усачов А.Е.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 15. С. 46–52.
- [6] *Исаев С.А., Баранов П.А., Жукова Ю.В.* и др. // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 1. С. 70–85.
- [7] Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками. Численное и физическое моделирование / Под ред. С.А. Исаева. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2016.
- [8] *Исаев С.А., Баранов П.А., Ватин Н.И.* и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 15. С. 50–57.
- [9] *Исаев С.А., Баранов П.А., Смуров М.Ю.* и др. // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 5. С. 665–669.
- [10] *Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е.* Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: Lap Lambert Academic Publishing, 2013.