

03

## **Расширение диапазона критических чисел Маха при управлении трансзвуковым обтеканием толстого (20%) профиля MQ со щелевым отсосом в круговой вихревой ячейке**

© С.А. Исаев, П.А. Баранов, А.Г. Судаков, А.Е. Усачов

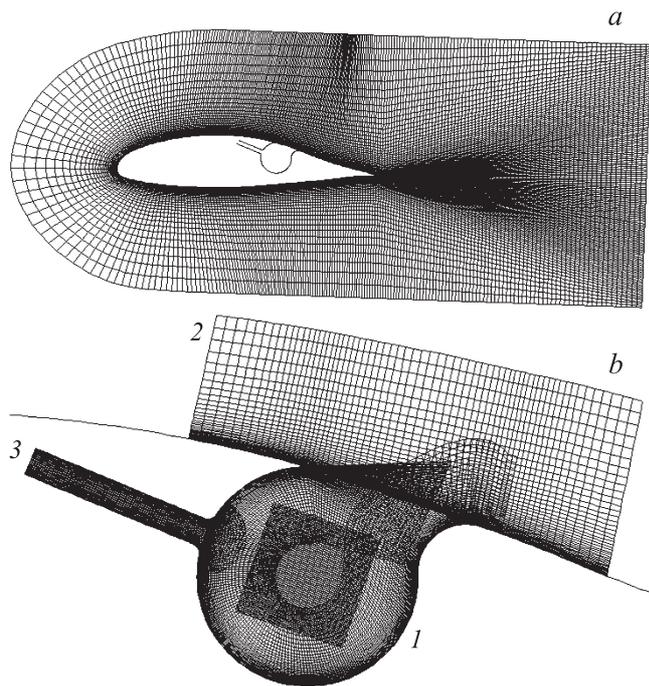
Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации  
Московский научно-исследовательский комплекс ЦАГИ  
E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступило в Редакцию 25 ноября 2013 г.

На основе решения факторизованным конечно-объемным методом уравнений Навье–Стокса и Рейнольдса, замыкаемых в последнем случае с помощью модифицированной с учетом кривизны линий тока модели переноса сдвиговых напряжений Менгера, обосновывается расширение диапазона критических чисел Маха при моделировании нестационарного обтекания толстого профиля MQ со щелевым отсосом в круговой вихревой ячейке.

Управление обтеканием толстых (порядка 35% хорды) несущих поверхностей с помощью расположенных в корпусе летательного аппарата вихревых ячеек запатентовано в проекте ЭКИП (Экология и прогресс) [1] и в дальнейшем анализировалось в монографии [2]. Профиль конструируется дугами окружности, соединенными снизу отрезком прямой, а система четырех разновеликих ячеек располагается на тыльной стороне верхней дужки. Интенсификация циркулирующего в ячейках потока при отсосе с поверхности размещенных в них центральных тел позволяет кардинально изменить картину отрывного течения и, как показано в [3,4], существенно снизить лобовое сопротивление кругового цилиндра, а также увеличить аэродинамическое качество толстого профиля. В [5] отмечено, что рассматриваемый способ организации течения не принадлежит к известным методам управления турбулентным пограничным слоем [6], а является способом управления циркуляцией профиля, т.е. в вихревых ячейках создается

весьма значительная суперциркуляция. Способ является энергозатратным, и при оценке его эффективности необходимо учитывать мощность, потребную для отсоса в ячейках, в пересчете на дополнительное лобовое сопротивление профиля [7]. Детальное исследование турбулентного обтекания несжимаемой жидкостью профиля модели ЭКИП под нулевым углом атаки [8] показало, что отсос в малогабаритных вихревых ячейках с оптимальной величиной скорости порядка 0.035 обеспечивает плавный, почти безотрывный характер течения и аэродинамическое качество, близкое к 19. При тонкой настройке скоростей отсоса в 4 вихревых ячейках на тыльной стороне профиля удастся повысить качество до 20.6. Анализ аэродинамических характеристик профиля ЭКИП [9] при изменении угла атаки  $\alpha$  от  $-30$  до  $25^\circ$  показал, что  $C_u$  превышает 1 во всем диапазоне изменения  $\alpha$  и достигает максимума в 2.5 в районе  $10-15^\circ$ . Следует отметить, что для гладких тонких профилей  $C_u$  не превосходит 1. Аэродинамическое качество толстого профиля не опускается ниже 12.5 в диапазоне изменения  $\alpha$  от  $-20$  до  $5^\circ$ . Переход к геттингеновскому профилю равной толщины [10] позволяет повысить  $C_u$  до 3.5 при аэродинамическом качестве 20 для  $\alpha = 15^\circ$ . Система управления для экиповского профиля оказывается эффективной при углах атаки более  $15-20^\circ$ , в то время для геттингеновского профиля она уже не работает. Продемонстрирована эквивалентность распределенного (с поверхности центрального тела) и сосредоточенного (щелевого) отсоса, т.е. определяющим параметром оказывается коэффициент расхода  $Cq$  (его оптимальная величина порядка 0.02). В [11] на примере обтекания сжимаемым газом профиля ЭКИП обнаружено существование критических чисел Маха  $M$ , при которых наблюдаются кризисные явления, и система управления с помощью вихревых ячеек оказывается неэффективной. Их величины имеют порядок 0.4–0.5 при умеренной (0.025) величине коэффициента расхода  $Cq$ . В рамках проекта Еврокомиссии выполнены комплексные исследования с акцентированием внимания к определению рациональной формы вихревой ячейки [12] и к физическому моделированию обтекания профиля, в частности разработки CIRA–MQ толщиной примерно 0.2 от хорды [13]. Цель данной работы — численно обосновать расширение диапазона критических чисел Маха при управлении обтеканием толстого профиля с вихревой ячейкой при некотором уменьшении его толщины (от 35 до 20%) и коэффициента расхода  $Cq$ .



**Рис. 1.** Многоблочные структурированные сетки, в том числе С-образная, согласованная с профилем MQ (а), и мелкомасштабные для вихревой ячейки (b): 1 — совокупность цилиндрической сетки в ячейке, квадратной „заплатки“ и кромочной сетки; 2 — внешняя переходная сетка от „окна“ вихревой ячейки к С-образной сетке около профиля; 3 — сетка в отводящем канале.

Профиль MQ [13] толщиной 0.1994 (рис. 1) расположен в равномерном потоке воздуха под углом атаки  $2^\circ$ . Число Маха набегающего потока  $M = 0.6$ , а число Рейнольдса, рассчитанное по хорде профиля,  $Re = 10^7$ . Длина хорды выбрана в качестве характерного линейного размера. Вихревая ячейка, близкая по форме к круговой, имеет радиус  $R = 0.058$ ;  $x$ -координата (в связанной системе координат) левой кромки — 0.5966; координата  $y$  центра ячейки в долях  $R$  —  $(-0.94)$ . Правая кромка ячейки сильно скруглена с радиусом 0.431 в долях  $R$  на участке протяженностью 0.1 (в долях  $R$ ); длина ячейки — 0.103.

В круговой вихревой ячейке, построенной по рекомендациям [12], реализуется отсос воздуха с помощью вентилятора в отводящем прямолинейном канале длиной 0.1 и шириной 0.015. Дуговая координата центра канала — 0.0673, а радиус скругления — 0.005 на длине внешнего участка 0.009. На выходе канала задается перепад давления 0.5 от удвоенного скоростного напора. Шаг сетки на вентиляторе 0.002.

Вводится многоблочная система структурированных с наложением сеток различной топологии, близких к ортогональным. Шаги сеток у задней кромки — 0.01, в носке снизу — 0.01, в носке сверху — 0.05, в районе вихревой ячейки — 0.001, у стенки —  $10^{-5}$ . Базовая декартовая сетка (рис. 1, *a*) разбивается на  $125 \times 74$  ячеек и охватывает область протяженностью от  $-11.4$  до  $44.6$  по поточной координате и от  $11$  до  $11$  поперек нее. Начало координатной системы помещается в центре профиля. Шаги в окрестности профиля в продольном и поперечном направлениях — 0.1. Сетка служит для дискретизации расчетной области с удалением на значительное расстояние проточных границ. На входной границе задаются фиксированные условия: характерная продольная скорость потока  $u = 1$  и нулевая вертикальная компонента  $v = 0$ , энергия турбулентности равна  $1.5 \cdot 10^{-6}$ , а ее масштаб — 1.

Вспомогательная декартовая сетка (рис. 1, *b*) накладывается на профиль и служит для перехода от крупномасштабной базовой сетки к мелкомасштабным сеткам около профиля. Она содержит  $98 \times 38$  ячеек и покрывает подобласть протяженностью от  $-1.4$  до  $4.52$  по потоку и от  $-1.01$  до  $1.05$  поперек него. Шаги в окрестности профиля — 0.05. Около профиля строится C-сетка, согласованная с ним. Она содержит  $392 \times 69$  ячеек и покрывает подобласть с размером по нормали к профилю 0.4. Следовая часть имеет удлинение 1.1.

Канал с вентилятором содержит  $121 \times 67$  ячеек, собственно ячейка O-типа —  $229 \times 67$ , квадратная заплатка на центральную зону —  $60 \times 62$  и внешняя сетка над окном ячейки —  $65 \times 68$ . Суммарное количество ячеек составляет примерно 70 000.

Многоблочные вычислительные технологии [14], основанные на использовании разномасштабных пересекающихся сеток, применены для решения нестационарных, осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, замкнутых уравнениями модифицированной с учетом кривизны линий тока модели переноса сдвиговых напряжений Ментера (в версии 2003 г.), и уравнения энергии. Обобщенная процедура коррекции давления применяется для расчета до-, транс- и сверхзвуковых

Осредненные интегральные и локальные характеристики автоколебательного режима обтекания профиля MQ при угле атаки  $2^\circ$

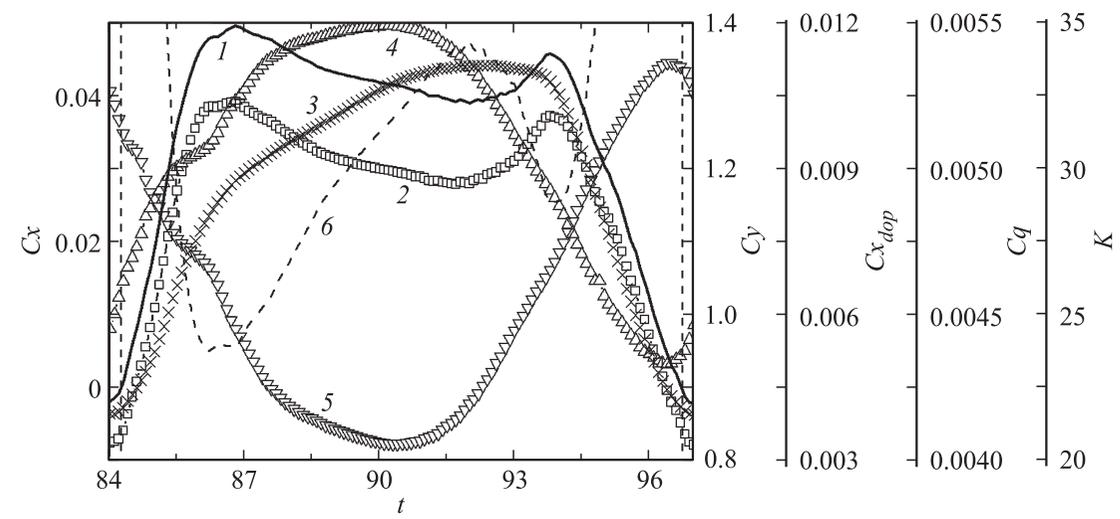
$Cx_{all}$	$Cx_{dop}$	$Cy$	$Cq$	$K$	$St$
0.0345	0.009	1.178	0.0046	34.1	0.077

течений на центрированных (с расположением определяющих параметров в центрах ячеек) сетках. В зонах пересечения сеток параметры определяются методом линейной интерполяции. Плотность на гранях ячеек рассчитывается с помощью выбранной противопоточной схемы. Временной шаг интегрирования выбирается равным 0.01.

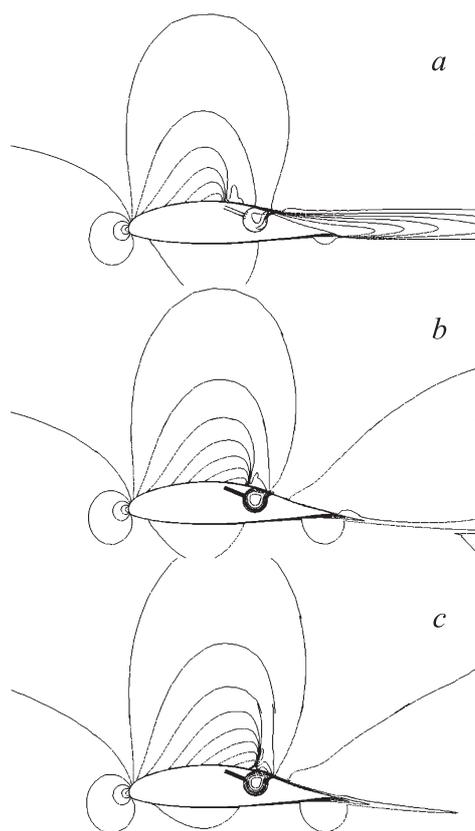
На рис. 2, 3 и в таблице приведены некоторые из полученных результатов, соответствующих автоколебательному режиму обтекания толстого профиля MQ при угле атаки  $2^\circ$ . Анализируются аэродинамические коэффициенты  $Cx_{all}$ ,  $Cx$ ,  $Cy$ ,  $K$ , коэффициент расхода  $Cq$  отсасываемого воздуха в вихревой ячейке и эволюция ударно-волновой картины обтекания на периоде колебаний  $Cy$  (от минимума до максимума и обратно) при изменении времени  $t$  от 84 до 97. При этом дополнительное сопротивление  $Cx_{dop}$ , обусловленное энергетическими затратами на отсос, определяется через потребную мощность, следуя [2,6,14]. Число Струхала  $St$ , рассчитанное по периоду колебаний  $Cy$ , оказывается равным 0.077, что примерно в 3 раза меньше, чем при образовании вихревой дорожки за круговым цилиндром [2].

Интересно отметить, что вблизи минимума  $Cy$  лобовое сопротивление профиля отрицательное, т.е. возникает тянущая сила, которая отчасти компенсируется при оценке суммарного сопротивления  $Cx_{all}$  энергетическими затратами. На периоде колебаний одному максимуму  $Cy$  соответствуют два максимума  $Cx$  и  $Cx_{all}$  аналогично поведению  $Cx$  для кругового цилиндра. Однако на временном промежутке между максимумами величина  $Cx$  изменяется незначительно. Дополнительное сопротивление резко возрастает и быстро снижается в начале и в конце периода колебаний  $Cy$ , в среднем составляя величину порядка 30% от осредненного  $Cx_{all}$ .

Аэродинамическое качество оказывается в целом достаточно велико, порядка 34, причем  $Cq$  в среднем невысок и составляет величину 0.0046, что в несколько раз меньше, чем в вихревых ячейках профиля



**Рис. 2.** Зависимости интегральных и локальных характеристик от времени на периоде колебаний  $C_y$ . 1, 2 — коэффициенты полного  $C_{x_{all}}$  и расчетного  $C_x$  лобового сопротивления; 3 —  $C_y$ ; 4 — коэффициент дополнительного сопротивления, вызванного энергетическими затратами  $C_{x_{dop}}$ ; 5 — коэффициент расхода  $C_q$ ; 6 — аэродинамическое качество  $K$ .



**Рис. 3.** Эволюция картин линий изомахов, проведенных с шагом 0.1, на периоде колебаний  $Sy$ .  $a - t = 84$ ;  $b - 90$ ;  $c - 94$ .

ЭКИП [11]. Изменение аэродинамических коэффициентов профиля MQ связано с периодическими колебаниями ударно-волновой структуры трансзвукового обтекания, формированием и исчезновением отрывной зоны за профилем.

Таким образом, численно обосновано расширение диапазона критических чисел Маха с приближением их к крейсерским величинами для толстых несущих профилей с вихревой ячейкой при уменьшении их толщины и аэродинамическом конструировании [12,13].

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проектам № 13-08-00322, 11-01-00039 и 14-01-00043.

## Список литературы

- [1] *Savitsky A.I., Schukin L.N., Karelin V.G.* et al. // United States Patent N 5417391, May 23, 1995 (Preceded by earlier Russian patent N 2015941 from 1991).
- [2] 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.
- [3] *Baranov P.A., Isaev S.A., Prigorodov Yu.S.* // Technical Physics Letters. 1998. V. 24. N 9. P. 671–673.
- [4] *Baranov P.A., Isaev S.A., Prigorodov Yu.S., Sudakov A.G.* // J. Engineering Physics and Thermophysics. 1999. V. 72. N 3. P. 550–553.
- [5] *Isaev S.A., Sudakov A.G., Baranov P.A., Prigorodov Yu.S.* // Doklady Physics. 2001. V. 46. N 3. P. 199–201.
- [6] *Isaev S.A., Prigorodov Yu.S., Sudakov A.G.* // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2002. V. 75. N 3. P. 579–583.
- [7] *Чжен П.* Управление отрывом потока. М.: Мир, 1979. 552 с.
- [8] *Baranov P.A., Isaev S.A., Prigorodov Yu.S.E., Sudakov A.G.* // Fluid Dynamics. 2003. V. 38. N 3. P. 387–396.
- [9] *Isaev S.A., Baranov P.A., Kudryavtsev N.A., Pyshnyi I.A., Sudakov A.G.* // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2003. V. 76. N 4. P. 877–887.
- [10] *Isaev S.A., Baranov P.A., Sudakov A.G., Kharchenko V.B.* // Thermophysics and Aeromechanics. 2007. V. 14. N 2. P. 169–186.
- [11] *Isaev S.A., Sudakov A.G., Baranov P.A., Mordinsky N.A.* // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2007. V. 80. N 6. P. 1193–1198.
- [12] *Donelli R., Ionelli P., Chernyshenko S., Zannetti I.* // AIAA J. 2009. V. 47. N 2. P. 451–467.
- [13] *De Gregorio F., Fraioli G.* // Proc. of 14th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal, 7–10 July, 2008. P. 1–12.
- [14] *Исаев С.А., Баранов П.А., Усачев А.Е.* Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. LAP LAMBERT Academic Publishing. Саарбрюкен, 2013. 316 с.