

03

Моделирование эффекта увеличения подъемной силы и повышения аэродинамического качества толстого геттингеновского профиля при оптимальном расположении вихревой ячейки

© С.А. Исаев¹, А.Г. Судаков¹, А.Е. Усачов², В.Б. Харченко¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

² Московский комплекс Центрального аэродинамического института
E-mail: isaev3612@yandex.ru

Поступило в Редакцию 8 декабря 2014 г.

На основе решения уравнений Рейнольдса, замкнутых с помощью скорректированной с учетом кривизны линий тока модели переноса сдвиговых напряжений Ментера, и уравнения энергии рассчитано турбулентное дозвуковое (с числом Маха $M = 0.05$) обтекание воздухом толстого 24%-го геттингеновского профиля под углом атаки 5° при варьировании положением малоразмерной (порядка 10% хорды) эллиптической вихревой ячейки с распределенным (со стороны центрального тела) фиксированным отсосом $Cq = 0.007$. Обнаружено двукратное уменьшение коэффициента лобового сопротивления Cx , трехкратное увеличение коэффициента подъемной силы Cy и примерно пятикратное повышение аэродинамического качества профиля с оптимальным расположением вихревой ячейки по сравнению с гладким вариантом при $Re = 10^5$.

Проблема совершенствования аэродинамических характеристик (АДХ) несущих поверхностей воздушных судов, в особенности на этапах взлета-посадки, наиболее важных для обеспечения безопасности полетов, продолжает привлекать внимание аэродинамиков [1]. Рассматриваемые режимы движения характеризуются невысокими скоростями полета (т.е. малыми числами Маха), в то же время на них требуется обеспечить высокую подъемную силу и аэродинамическое качество. Поэтому в последние годы проявляется повышенный интерес

к обтеканию толстых профилей, для улучшения обтекания которых в их контурах располагаются вихревые ячейки с распределенным (со стороны центральных тел) и сосредоточенным (щелевым) отсосом для интенсификации циркулирующих в них потоков. Сконструирован аппарат ЭКИП (экология и прогресс) с контуром крыла толщиной 37.5% хорды, состоящим из дуг окружностей, соединенных отрезками прямых линий. На тыльной стороне профиля располагаются четыре эллиптические ячейки с отсосом со стороны центральных тел [2]. Обоснование концепции вихревых ячеек с распределенным отсосом проведено в [3], причем рассматриваемый подход к управлению обтеканием тел связан не с отсосом пограничного слоя на несущей поверхности, а с созданием циркуляции в вихревых ячейках, названной в [4] суперциркуляцией. Оценка дополнительного сопротивления, обусловленного энергетическими затратами (на отсос), введена в [5], а в [6,7] детально рассмотрены режимы несжимаемого обтекания толстого профиля аппарата ЭКИП при варьировании числом Рейнольдса и углом атаки. В [8] проведено численное исследование несжимаемого обтекания 35.2% геттингеновского профиля с четырьмя вихревыми ячейками при различных углах атаки, а также проведено его сопоставление с профилем ЭКИП. Учет влияния сжимаемости среды на обтекание толстого профиля ЭКИП осуществлен в [9], причем показано существование критических чисел Маха порядка 0.4–0.5, свыше которых система вихревых ячеек оказывается неработоспособной. Несущие профили с одной вихревой ячейкой рассмотрены в [10,11], причем акцент делается на экспериментальном изучении влияния ячейки на обтекание [10] и на расширении диапазона критических чисел Маха при умеренных толщинах профиля на примере 20%-го профиля MQ со щелевым отсосом в вихревой ячейке [11].

В задачу данной работы входило численное обоснование увеличения подъемной силы и повышения аэродинамического качества 24%-го геттингеновского профиля на основе анализа влияния расположения малоразмерной эллиптической вихревой ячейки с аналогичным внутренним центральным телом при фиксированном коэффициенте отсоса 0.007 (примерно как в [10]) на характер турбулентного обтекания и аэродинамические характеристики профиля при угле атаки 5° , числах Маха и Рейнольдса 0.05 и 10^5 соответственно.

Рассматривается стационарное турбулентное обтекание несжимаемой вязкой жидкостью толстого (24%) геттингеновского профиля

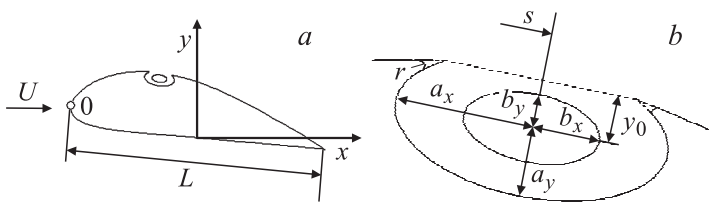


Рис. 1. Геттингенский профиль толщиной 0.24 с вихревой ячейкой (а), эллиптическая форма вихревой ячейки со скругленными острыми кромками, вмонтированной в толстый профиль (b). 0 — точка отсчета координаты s по длине контура.

традиционной формы с расположенными на верхней дужке вихревыми ячейками (рис. 1, а). По постановке данная задача мало отличается от аналогичной для экиповского профиля [7,8]. Центр декартовой системы координат x, y выбирается в середине нижней дужки профиля. В качестве параметров обезразмеривания задаются длина хорды L и величина скорости набегающего потока U . Число Рейнольдса Re , как и в [7], выбирается равным 10^5 , а угол атаки $\alpha = 5^\circ$. Как следует из [7], при заданном числе Рейнольдса аэродинамические характеристики экиповского профиля с вихревыми ячейками близки к асимптотическим величинам.

Вихревая ячейка представляет собой каверну эллиптической формы с размерами полуосей a_x и a_y с размещенными в них центральными телами такой же эллиптической формы с полуосями b_x и b_y . Радиус скругления кромки каверны обозначается r . Принимается, что $b_x = 0.5a_x$, $a_y = 0.5a_x$, $b_y = 0.5b_x$. Положение ячейки задается с помощью дуговой координаты s и размером локального заглабления ее центра по отношению к „окну“ y_0 ($y_0 = 0.35a_x$). a_x задается равным 0.0584, а $r = 0.001012$. Величина s варьируется от 0.2 до 0.7. Коэффициент массового расхода через центральное тело c_q составляет 0.007.

Границы прямоугольной расчетной области с размерами 55.19×21.82 располагаются на значительном удалении от профиля. Расстояние от центра системы координат до входа составляет 11.14, а до верхней границы — 10.91. На входе расчетной области задаются фиксированные граничные условия, соответствующие равномерному течению в рабочей части аэродинамической трубы. Степень турбулентности

потока принимается равной 1.5%, а масштаб турбулентности — 1, т. е. длине хорды. На выходных границах задаются так называемые „мягкие“ граничные условия (продолжение решения, следуя квадратичной экстраполяцией). На твердых поверхностях ставится условие прилипания, а турбулентные характеристики рассчитываются, следуя подходу в [5].

Многоблочная сетка около толстого профиля с вихревыми ячейками включает в себя прежде всего прямоугольную сетку, покрывающую рассматриваемую расчетную область и содержащую расчетную ячейку 119×74 . Эта довольно грубая сетка с минимальным шагом 0.1. Для перехода к С-сетке, окружающей профиль, вводится промежуточная прямоугольная сетка в подобласти с размерами 4.2×2.07 (с удалением передней границы от начала координат на расстояние 1.14). Эта сетка содержит 95×42 ячеек с одинаковыми шагами по координатным направлениям, равными 0.05. Размеры подобласти и густота сетки вполне достаточные для отображения отрывных зон около профиля. Внутри подобласти располагается С-образная сетка, построенная вокруг профиля и содержащая 357×38 ячеек. Она покрывает полосу шириной 0.4, которая продолжается на расстояние 1.5 за профилем ниже по потоку. Пристеночный шаг задается равным 10^{-4} .

Для повышения точности описания вихревого течения в окрестности окон каверн вводится прилегающая к ней криволинейная трехчастная сетка, содержащая 75×35 ячеек. Ее левые и правые фрагменты являются цилиндрическими сетками, состыкованными с поверхностью профиля, а центральная часть непосредственно над окном каверн представляет собой косоугольную сетку с нижней и верхней прямолинейными образующими. Толщина сеточных слоев равна 0.05, а пристеночный шаг — 10^{-4} .

Кольцевой канал между контуром каверны вихревой ячейки и поверхностью центрального тела разбивается цилиндрической сеткой, содержащей 120×43 ячеек. Сеточные узлы сгущаются вблизи твердых поверхностей, а также в районах кромок каверн. Пристеночные шаги принимаются равными 10^{-4} . Важно отметить необходимость корректного отображения особенностей течения в окрестности скругленных острых кромок, где размещаются специальные мелкомасштабные сеточные структуры, содержащие по 47×25 ячеек.

Осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса, записанные относительно декартовых составляющих скорости u , v , замыкаются дифференциальными уравнениями модели переноса сдвиговых напря-

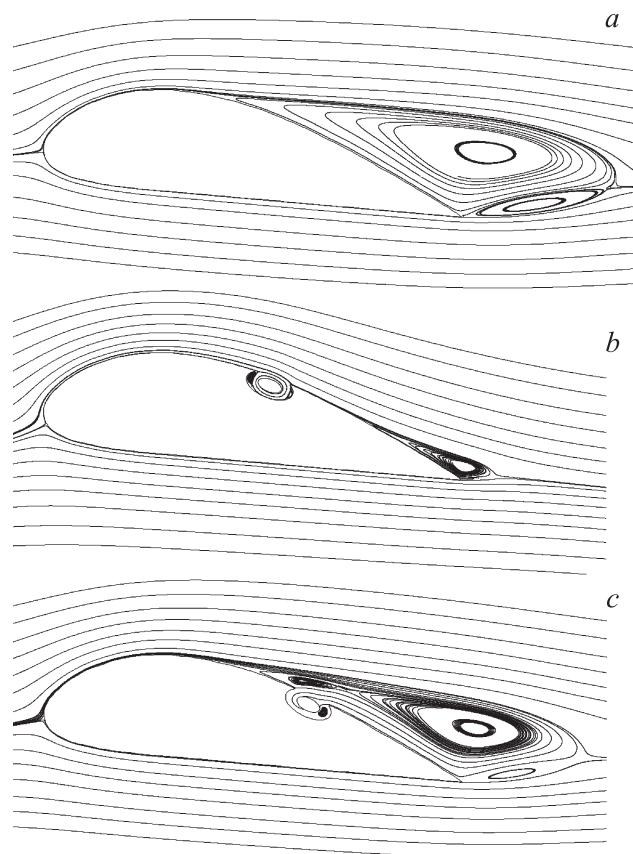


Рис. 2. Картины линий тока около 24%-го геттингеновского профиля (a), в том числе с вихревыми ячейками при $s = 0.6$ (b) и 0.7 (c).

жений Менгера [12], линеаризуются и записываются относительно приращений зависимых переменных [13]. Версия MSST 2003 года [12] модифицируется с учетом влияния кривизны линий тока на характеристики турбулентности при введении корректирующей функции, зависящей от турбулентного числа Ричардсона Ri_t . В рамках подхода Лешчинера и Роди [14] корректирующая функция $f_c = 1/(1 + C_c \times Ri_t)$

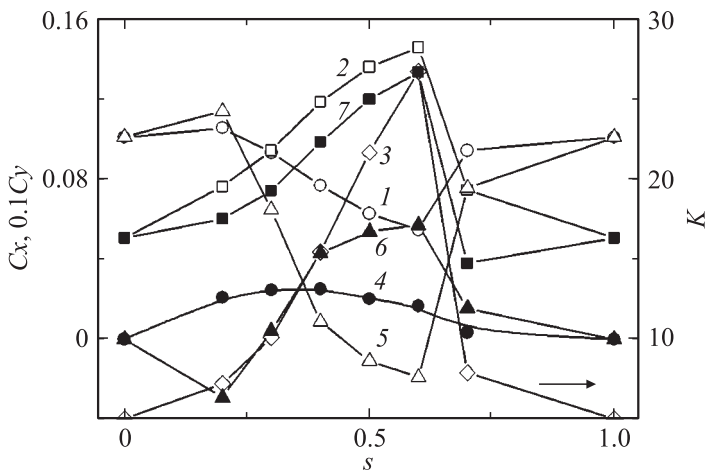


Рис. 3. Влияние расположения вихревой ячейки на коэффициент лобового сопротивления C_x (кривая 1), коэффициент подъемной силы C_y (2), аэродинамическое качество K (3), дополнительное сопротивление, обусловленное энергетическими затратами (4), C_x профиля (5), C_x вихревой ячейки (6), C_y профиля (7).

напрямую влияет на вихревую вязкость. Полуэмпирическая константа C_c равна 0.02.

На рис. 2 показаны некоторые из полученных результатов по перестройке картины обтекания при достижении критического (оно же оптимальное) положения вихревой ячейки на профиле. На рис. 3 представлены интегральные характеристики профиля с вихревыми ячейками при варьировании дуговой координаты центра окна ячейки.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Вихревая ячейка эллиптической формы с линейным размером порядка 10% хорды с фиксированным равномерным отсосом с поверхности центрального тела ($C_q = 0.007$) улучшает аэродинамические характеристики 24%-го геттингеновского профиля под углом атаки 5° в дозвуковом воздушном потоке с $Re = 10^5$ при любом ее размещении на верхней дужке.

2. Обнаружено оптимальное размещение вихревой ячейки на тыльной стороне профиля, при котором подъемная сила и аэродинамическое

качество максимальны, а сопротивление с учетом энергетических потерь минимально, при значении дуговой координаты центра окна ячейки, отсчитанной от носка профиля, равном 0.6. Обтекание профиля в этом случае близко к безотрывному.

3. Минимальное аэродинамическое сопротивление 24%-го геттингеновского профиля с вихревой ячейкой оказывается примерно вдвое меньше сопротивления гладкого профиля, максимальная подъемная сила в 3 раза (C_y порядка 1.5), а максимальное аэродинамическое качество в 5 раз (порядка 27) превышают соответствующие характеристики штатного образца при угле атаки 5° , $M = 0.05$ и $Re = 10^5$.

4. Существует критическое положение вихревой ячейки на верхней дужке геттингеновского профиля, за которым она не работает и реализуется отрывной режим, близкий к обтеканию гладкого профиля.

5. При близких к оптимальным расположениям вихревой ячейки на профиль действует тянущая сила и его C_x отрицательный, в то же время лобовое сопротивление вихревой ячейки максимальное и его величина превосходит по абсолютной величине C_x профиля.

6. Коэффициент дополнительного сопротивления, обусловленный энергетическими затратами, максимален при расположении ячейки на передней стороне профиля, т.е. $s < 0.5$, причем его величина не превышает 40% от величины минимального C_x профиля с вихревой ячейкой.

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 России № 14.Z50.31.0003.

Список литературы

- [1] *Петров А.В.* Энергетические методы увеличения подъемной силы крыла. М.: Физматлит, 2011.
- [2] *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).
- [3] *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.

- [4] *Isaev S.A., Sudakov A.G., Baranov P.A., Prigorodov Yu.S.* // *Doklady Physics*. 2001. V. 46. N 3. P. 199–201.
- [5] Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки / Под ред. А.В. Ермишина и С.А. Исаева. М.: МГУ, 2003. 360 с.
- [6] *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.
- [7] *Baranov P.A., Isaev S.A., Prigorodov Yu.S., Sudakov A.G.* // *Fluid Dynamics*. 2003. V. 38. N 3. P. 387–396.
- [8] *Isaev S.A., Baranov P.A., Sudakov A.G., Kharchenko V.B.* // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2007. V. 14. N 2. P. 169–186.
- [9] *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.
- [10] *De Gregorio F., Fraioli G.* // *Proc. 14th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*. Lisbon, Portugal, 7–10 July, 2008. P. 1–12.
- [11] *Isaev S.A., Baranov P.A., Sudakov A.G., Usachov A.E.* // *Technical Physics Letters*. 2014. V. 40. N 5. P. 417–420.
- [12] *Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.* // *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4* / Ed. K. Hajalic, Y. Nogano, M. Tummers. Begell House, Inc., 2003. 8 p.
- [13] *Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е.* Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэротермодинамике. Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 316 с.
- [14] *Isaev S.A., Baranov P.A., Zhukova Yu.V., Usachov A.E., Kharchenko V.B.* // *J. Engineering Physics and Thermophysics*. 2014. V. 87. Iss. 4. P. 1002–1015.