

03

## **Подавление дорожки Кармана и снижение лобового сопротивления кругового цилиндра с двумя вихревыми ячейками**

© С.А. Исаев, П.А. Баранов, Н.И. Ватин,  
Ю.В. Жукова, А.Г. Судаков

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской  
авиации, Россия  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
Россия  
Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск  
E-mail: isaev3612@yandex.ru

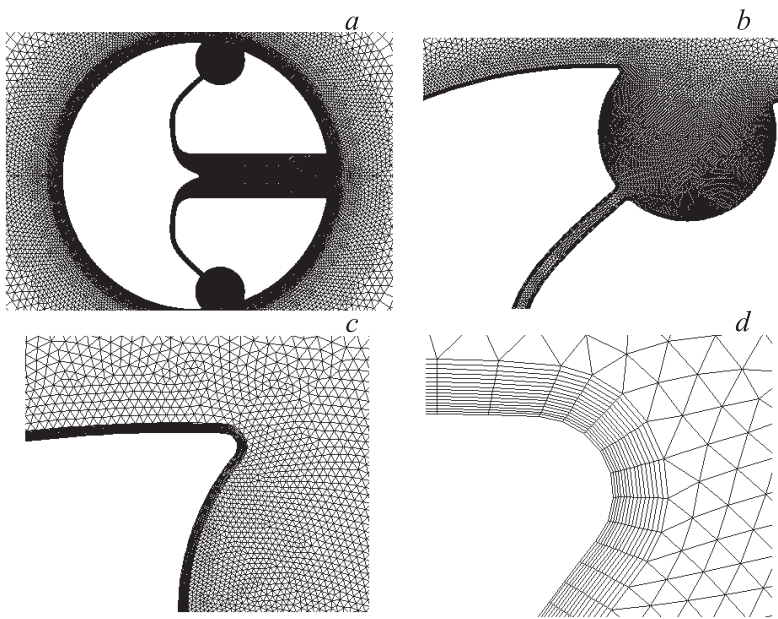
Поступило в Редакцию 18 марта 2014 г.

Численный анализ нестационарного двумерного несжимаемого обтекания (при числе Рейнольдса 40 000) кругового цилиндра с двумя симметричными вихревыми ячейками при организации в них щелевых отсосов в центральный канал с помощью размещенного там вентилятора и истечении низконапорной струи проведен на основе конечно-объемного решения уравнений Рейнольдса, замкнутых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Менгера. Показано, что отсос в малоразмерных ячейках интенсифицирует внутри них циркуляционное течение и приводит к перестройке крупномасштабной структуры обтекания цилиндра, сопровождающейся подавлением вихревой дорожки Кармана и стабилизации следа, характеризующейся легкой асимметрией. Лобовое сопротивление цилиндра уменьшается почти втрое при оптимальном коэффициенте расхода отсасываемого воздуха.

Концепция управления обтеканием летательных аппаратов интегральной компоновки (типа „летающее толстое крыло“) была предложена Л.Н. Шукиным при конструировании аппарата ЭКИП (Экология и прогресс) [1] и заключалась в расположении на его тыльной стороне ряда активных вихревых ячеек. Каждая из ячеек представляла собой криволинейный вырез эллиптической формы в контуре объекта, внутри которого располагалось центральное тело с равномерно распре-

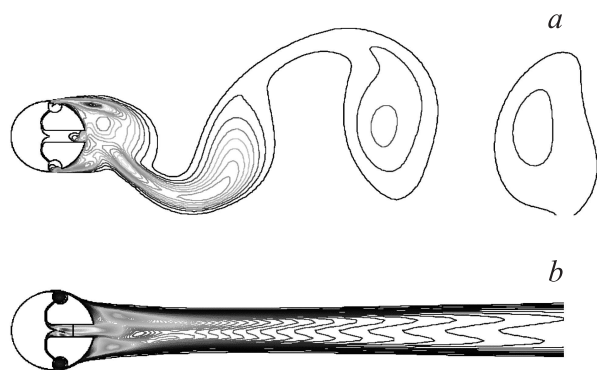
ленным отсосом. Размещение такой малоразмерной вихревой ячейки цилиндрической формы на тыльной стороне кругового цилиндра с разделительной пластиной в ближнем следе приводит к перестройке крупномасштабной структуры отрывного турбулентного обтекания тела и к снижению рассчитанного лобового сопротивления [2]. В [3] показано, что существует критическая скорость отсоса  $Vn$  порядка 0.031 от характерной скорости невозмущенного потока, при которой возвратно-циркуляционное течение в вихревой ячейке на круговом цилиндре резко интенсифицируется и приводит к скачкообразному изменению режима обтекания и падению лобового сопротивления (число Рейнольдса  $Re = 10^4$ ). В [4] предложена методика оценки дополнительного сопротивления, связанного с мощностью, необходимой для обеспечения отсоса заданной интенсивности ( $Vn$ ), при этом предполагается, что отсасываемая жидкость сбрасывается в среду с нулевым избыточным давлением. Оказалось, что дополнительное сопротивление цилиндра растет примерно пропорционально квадратичной зависимости от скорости отсоса жидкости с поверхности центрального тела в вихревой ячейке. Существует оптимум  $Vn$  ( $Vn_{opt} \approx 0.034$ ), при котором скорректированный коэффициент лобового сопротивления принимает минимальное значение:  $Cx_{all} = 0.35$ , что на 53% ниже, чем коэффициент лобового сопротивления гладкого кругового цилиндра. В [5], аналогичной [4], при  $Re = 14\,500$  уточняется оптимальная величина  $Vn_{opt} \approx 0.029$ , при которой  $Cx_{all}$  оказывается равным 0.33, что на 56% ниже, чем коэффициент лобового сопротивления гладкого кругового цилиндра. Сглаживание острой кромки круглой вихревой ячейки ниже по потоку способствует примерно 10%-ному снижению лобового сопротивления с учетом энергетических затрат.

Ни в одной из выполненных ранее работ не конкретизировалась система отсоса в вихревых ячейках, лишь в [1] предполагалось для этой цели использовать эжекцию воздуха в двигательную установку. Также было интересно оценить приемлемость упрощенной модели оценивания энергетических затрат [4]. По этим причинам здесь рассматривается конфигурация кругового цилиндра с двумя симметричными цилиндрическими ячейками, подобная ранее изученной геометрии [4,5], дополненная двумя криволинейными щелевыми трактами, соединяющимися в центральном канале, стенки которого параллельны плоскости симметрии. В середине центрального канала размещается вентилятор, обеспечивающий отсос в ячейках (рис. 1).



**Рис. 1.** Расчетная сетка для моделирования обтекания кругового цилиндра с вихревыми ячейками (*a*) и укрупненные фрагменты сетки в ареале вихревой ячейки (*b*), в окрестности перехода от контура цилиндра к круговой каверне (*c*) и вблизи скругленной кромки ячейки (*d*).

Численное моделирование низкоскоростного обтекания воздухом цилиндра с вихревыми ячейками выполняется на основе решения конечно-объемным методом нестационарных уравнений Рейнольдса, замкнутых уравнениями стандартной модели переноса сдвиговых напряжений Ментера [6]. Вихревые ячейки имеют форму цилиндрического выреза диаметром 0.183. Все линейные размеры отнесены к диаметру цилиндра  $D$  (0.03 м). Центры вырезов располагаются со смещением по потоку от центра цилиндра на расстояние 0.0915 в продольном направлении и отстоят от плоскости симметрии на расстояние 0.433. Криволинейный щелевой канал шириной 0.0083 для отсоса воздуха располагается в ячейках под углом  $45^\circ$  к плоскости симметрии, по направлению против потока. Каналы соединяются в центре цилиндра



**Рис. 2.** Сравнение картин изолиний турбулентной энергии для цилиндра в отсутствие (а) и в присутствии (b) вентилятора и графики изменения во времени коэффициентов сопротивления (c) и подъемной силы (d) для цилиндра без вентилятора (1) и с ним (2).

и переходят в центральный канал шириной 0.167 с параллельными плоскости симметрии стенками. На расстоянии 0.167 от центра цилиндра в центральном канале располагается вентилятор, модель которого взята из [6]. Радиусы скругления кромок ячеек и переходов к щелевым каналам равны 0.005. Прямоугольная расчетная область, в центре которой располагается цилиндр, простирается на 23 диаметра в продольном направлении и на 21 диаметр в поперечном.

Схемы второго порядка аппроксимации по пространству и времени используются для представления членов уравнений и интегрирования по времени. На входе в расчетную область задаются условия невозмущенного потока, а на выходе из нее — мягкие граничные условия. Степень турбулентности на входе в область принимается равной 1% от характерной скорости невозмущенного потока  $U$  (19.5 m/s), а масштаб турбулентности равен 1. На обтекаемых поверхностях задается условие прилипания. Число Рейнольдса принимается равным  $4 \cdot 10^4$ . Шаг по времени равен 0.01 от характерного времени, определенного как отношение  $D/U$ .

Общее количество расчетных ячеек неструктурированной сетки, сгущающейся к стенкам цилиндра, вихревой ячейки и внутренних трактов, составляет порядка 600 тысяч (рис. 1). Расчет обтекания

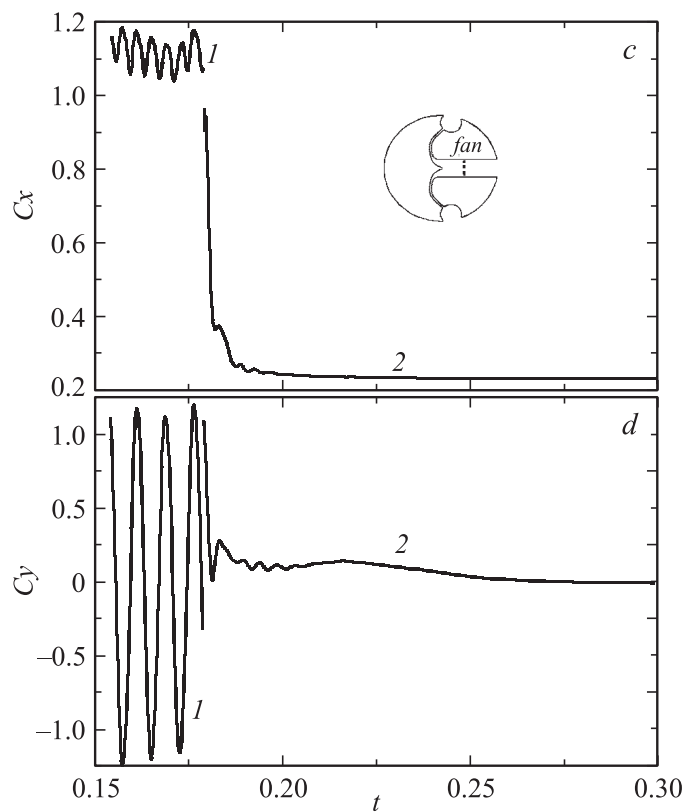
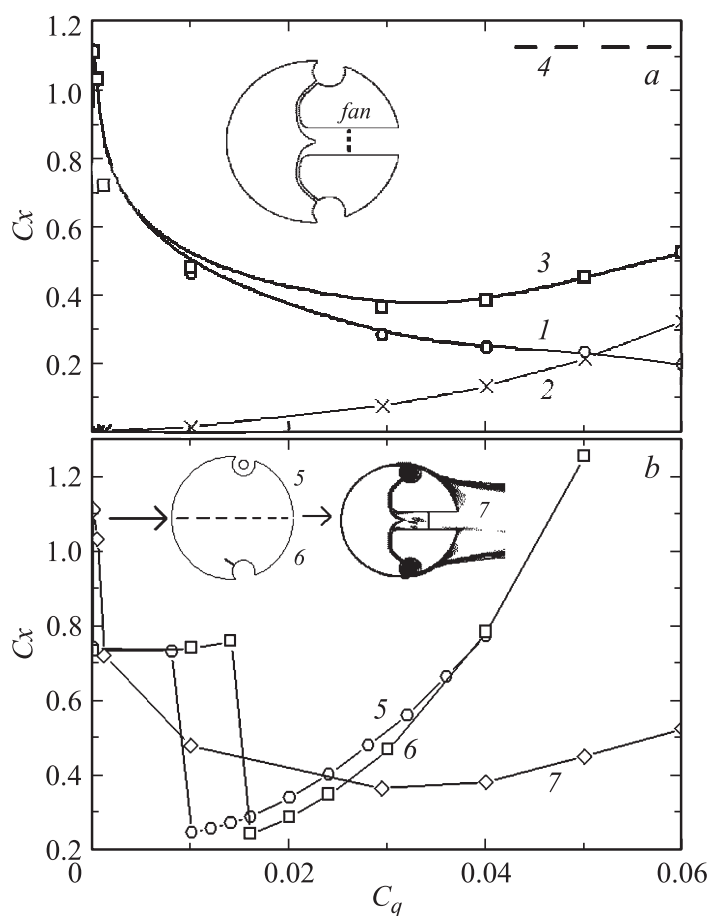


Рис. 2 (продолжение).

цилиндра с вихревыми ячейками проводится с отключенным граничным условием „вентилятор“ до тех пор, пока решение не выходит на периодический режим. На рис. 2,а показана картина обтекания кругового цилиндра с образованием вихревой дорожки Кармана. Аэродинамические характеристики цилиндра с отключенным вентилятором (рис. 2,с,д) изменяются во времени по близким к периодическим зависимостям. Амплитуды колебаний  $C_x$  и  $C_y$  близки к аналогичным характеристикам для кругового цилиндра [7]. Включение вентилятора при задании незначительного по величине перепада давления (0.0125 atm),



**Рис. 3.** Сравнение зависимостей: *a* — от коэффициента расхода отсасываемого воздуха  $C_q$  осредненных во времени расчетного коэффициента  $C_x$  (1), коэффициента дополнительного сопротивления  $C_{x_{доп}}$  (2), суммарного коэффициента лобового сопротивления  $C_{x_{all}}$  (3) цилиндра с вихревыми ячейками и  $C_x$  цилиндра без ячеек; *b* — от  $C_q$  суммарных коэффициентов лобового сопротивления  $C_{x_{all}}$  полуцилиндра с круговой ячейкой при распределенном отсосе со стороны центрального тела (5) и сосредоточенном (щелевом) отсосе (6) и  $C_{x_{all}}$  кругового цилиндра с двумя вихревыми ячейками (7).

соответствующего коэффициенту расхода  $Cq$  порядка 0.06, приводит к подавлению вихревой дорожки Кармана и стабилизации ближнего следа (рис. 2, *b*).

Влияние  $Cq$  на рассчитанное сопротивление по распределениям давления и трения по омываемым поверхностям  $Cx$ , дополнительное сопротивление, обусловленное приложенной мощностью на вентиляторе  $Cx_{dop}$ , и суммарное лобовое сопротивление цилиндра с вихревыми ячейками  $Cx_{all}$  (рис. 3) демонстрируют противоположные тенденции изменения зависимостей  $Cx$  (1) и  $Cx_{dop}$  (2) с ростом  $Cq$ . В результате зависимость суммарного сопротивления  $Cx_{all}$  ( $Cq$ ) имеет ложку с минимумом (3), равным 0.38, при оптимальной величине  $Cq = 0.033$ . В сравнении с отключенным вентилятором (4) сопротивление  $Cx_{all}$  снижено почти в 3 раза.

Сравнение зависимостей суммарного сопротивления  $Cx_{all}$  ( $Cq$ ), рассчитанного для цилиндров с разделительной пластиной с вихревыми ячейками при наличии распределенного (со стороны центральных тел 5) и сосредоточенного (щелевого 6) отсоса с использованием многоблочных вычислительных технологий и упрощенного подхода к оценке энергетических затрат [5,8], и полученных результатов (7) показывает их удовлетворительное количественное согласие.

Таким образом, отсос в вихревых ячейках приводит к подавлению вихревой дорожки Кармана, смещению точки отрыва и стабилизации турбулентного следа за цилиндром. При оптимальном  $Cq = 0.038$  достигается минимум суммарного лобового сопротивления, определенного с учетом энергетических затрат.  $Cx_{all}$  при этом падает почти втрое по сравнению с круговым цилиндром без ячеек.

Подтверждена приемлемость разработанных ранее упрощенных стационарных моделей турбулентного симметричного обтекания цилиндра с разделительной пластинкой и с круговой вихревой ячейкой при распределенном (со стороны центрального тела) и сосредоточенном (щелевом) отсосе в предположении о переброске жидкости в область нулевого избыточного давления.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проектам № 14-01-00043, 14-08-90001 и при 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] *Savitsky A.I., Schukin L.N., Karein V.G.* et al. // United State Patent 5417391. May 23, 1995. (Preceded by earlier Russian patent N 2015941 from 1991).
- [2] *Baranov P.A., Isaev S.A., Prigorodov Yu.S., Sudakov A.G.* // Technical Physics Letters. 1998. V. 24. N 9. P. 671–673.
- [3] *Baranov P.A., Isaev S.A., Prigorodov Yu.S., Sudakov A.G.* // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2000. V. 73. N 4. P. 705–712.
- [4] *Isaev S.A., Prigorodov Yu.S., Sudakov A.G.* // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2002. V. 75. N 3. P. 579–583.
- [5] *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.
- [6] Fluent Inc. Fluent 6.3. Users Guide. Lebanon, 2006.
- [7] *Isaev S.A., Baranov P.A., Kudryavtsev N.A., Lysenko D.A., Usachov A.E.* // J. Engineering Physics and Thermophysics. 2005. V. 78. N 6. P. 1199–2013.
- [8] *Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е.* Многоблочные вычислительные технологии в пакете VP2/3 по аэродинамике. Саарбрюкен: LAP, 2013. 316 с.