

01;03

Идентификация механизма головной стабилизации при численном моделировании ламинарного несимметричного обтекания цилиндра с выступающим диском потоком вязкой несжимаемой жидкости

© С.В. Гувернюк, С.А. Исаев, А.Г. Судаков

Академия гражданской авиации,
196210 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 9 февраля 1998 г.)

При решении факторизованным конечно-объемным методом уравнений Навье–Стокса в рамках упрощенного подхода на основе аналитического задания метрических коэффициентов анализируется физический механизм головной стабилизации, обусловленный деформацией пространственных вихревых структур, организованных при обтекании цилиндра с выступающим тонким диском.

Концепция организации обтекания тел за счет преднамеренного формирования вблизи них крупномасштабных вихревых структур при размещении выступающих тонких пластин и дисков, предложенная более двадцати лет назад И.А. Беловым [1], оказалась исключительно плодотворной для достижения положительных эффектов снижения аэродинамического сопротивления плохообтекаемых тел и существенного повышения их статической устойчивости (последний эффект получил название эффекта головной стабилизации). Выбор композиции затупленных тел с выступающим соосным диском позволил в несколько (в 2–4) раз уменьшить их волновое сопротивление в режиме сверхзвукового обтекания [2] и почти на два порядка снизить профильное сопротивление цилиндра [3–4] при осесимметричном турбулентном обтекании его потоком несжимаемой жидкости.

Проблема снижения сопротивления движению тел с организованным отрывом потока как первая часть комплексной задачи выбора аэродинамического облика тел нетрадиционной формы получила подробное и успешное разрешение в рамках численного и физического моделирования. Существование оптимальных по профильному и лобовому сопротивлению компоновок диска и цилиндра большого удлинения для режима ламинарного обтекания [5], оценка существенного влияния на сопротивление тел с передней срывной зоной степени турбулентности набегающего потока [6], распространение идеи организованного отрыва потока на течение в ближнем следе за телом и поиск оптимальных по сопротивлению компоновок цилиндра малого удлинения с выступающими дисками, сопоставимых по C_x с телами удобообтекаемой формы [7], — далеко не полный перечень результатов выполненных систематических исследований по указанной проблематике.

Первичная проработка проблемы статической устойчивости тел с организованными крупномасштабными вихревыми структурами осуществлена на примере задачи обтекания грузов, транспортируемых на внешней подвеске вертолетами [8,9]. Техническое решение этой практической (эксплуатационной) задачи состоит в вы-

боре надлежащих размеров и расположения щита перед торцом параллелепипеда, имитирующего груз типа балки или контейнера. Однако обеспечить устойчивость полета тел такой компоновки удалось только при использовании хвостовых стабилизаторов. В результате комплексного подхода на основе расчетов, трубного эксперимента и летных испытаний предложенное решение было обосновано, однако эффект головной стабилизации и гидродинамические аспекты его управляющего механизма не получили достаточного освещения. В определенной мере это обусловлено значительными вычислительными трудностями решения задачи пространственного обтекания тел нетрадиционной компоновки с организованными отрывными зонами. Таким образом, очевидный дефицит информации по головной стабилизации и необходимость более качественного и точного разрешения данной проблемы продиктовали обращения к классической задаче обтекания потоком вязкой несжимаемой жидкости полубесконечного цилиндра с диском при ненулевом угле атаки с детализацией решения в пределах передней срывной зоны.

В данном численном исследовании центральное место уделено детальному анализу управляющего механизма головной стабилизации и идентификации пространственных вихревых структур методом компьютерной визуализации течения на основе полученных картин растекания потока по контрольным поверхностям и наблюдения за треками меченых жидких частиц при использовании пакета графической интерпретации результатов численных расчетов Tecplot. Рассматривается оптимальная по профильному сопротивлению (при высоких числах Рейнольдса [3,4]) компоновка полубесконечного цилиндра с выступающим диском ($d = 0.75$, $l = 0.375$) в режиме устойчивого ламинарного обтекания при $Re = 700$ и 1000 с образованием передней отрывной зоны при углах атаки 0 и 5° . Диаметр соединительного стержня 0.18 . В качестве характерных масштабов выбраны диаметр цилиндра и скорость набегающего потока.

В отличие от развитого ранее подхода [9] по численному моделированию отрывного обтекания груза при

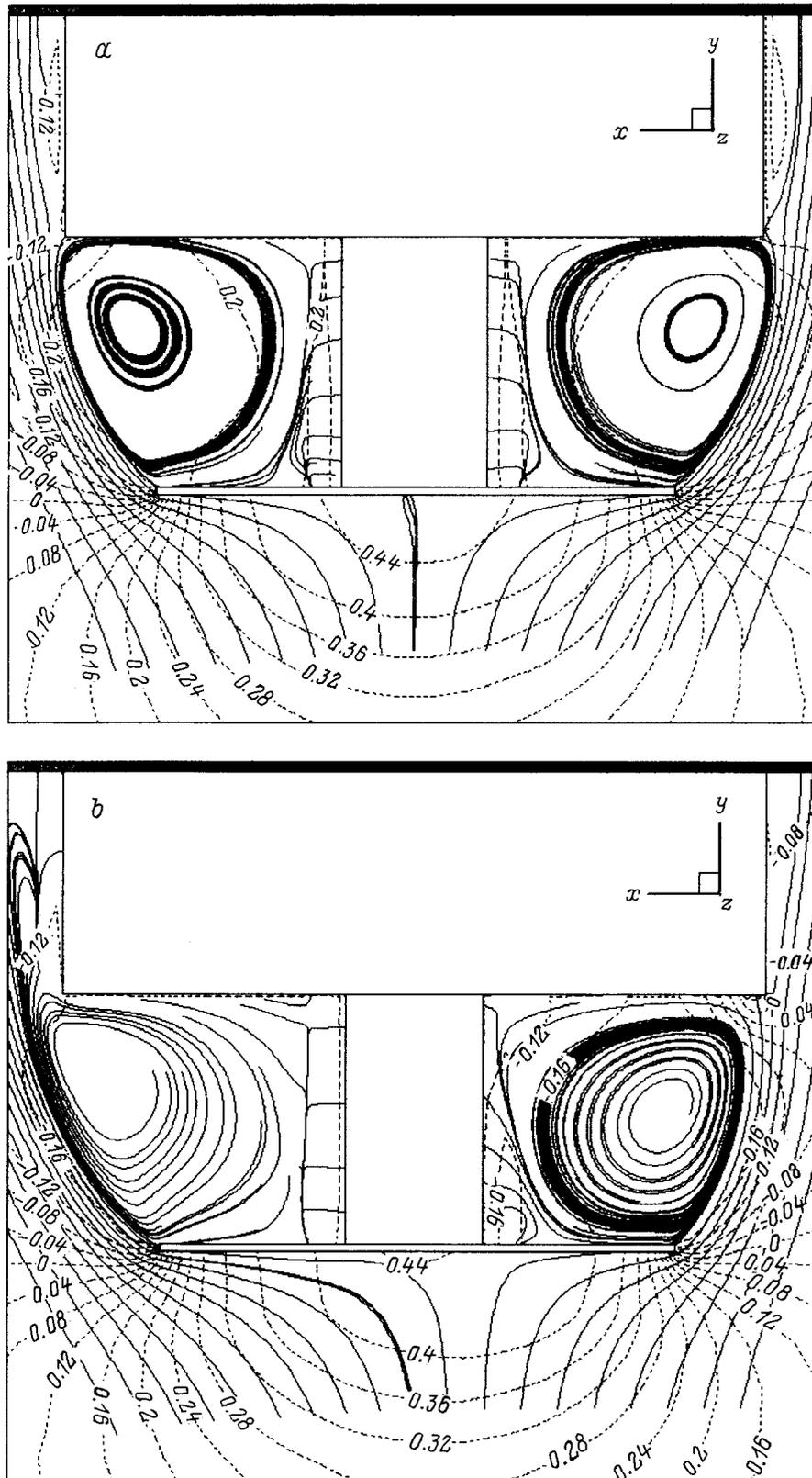


Рис. 1. Картина обтекания полубесконечного цилиндра с диском диаметра $d = 0.75$ и зазором $l = 0.375$ при числе Рейнольдса $Re = 10^3$ в осевой плоскости $x-y$ при углах атаки 0° (a) и 5° (b) с нанесенными пунктиром изобарами (избыточное давление отнесено к удвоенному скоростному напору).

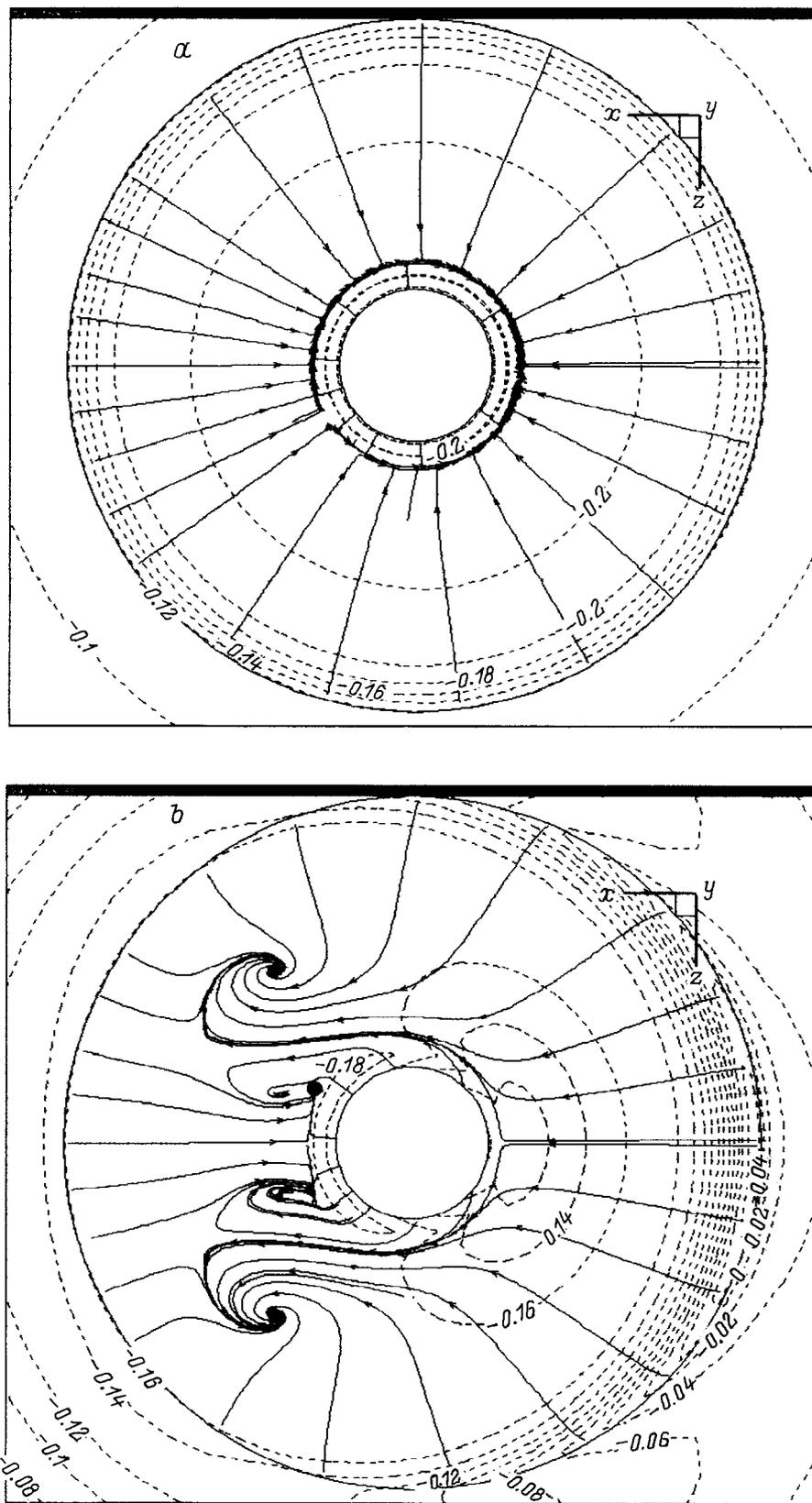


Рис. 2. Картина растекания жидкости по торцу цилиндра с выступающим диском ($Re = 10^3$) при углах атаки 0 (а) и 5° (б) с нанесенными пунктиром изобарами.

Суммарные аэродинамические характеристики рассматриваемых затупленных тел и их составляющие

Re	Полубесконечный цилиндр		Компоновка диск–полубесконечный цилиндр при $d = 0.75, l = 0.375$			
	700		700		1000	
α	0	5°	0	5°	0	5°
C_{X1}	0.762	0.779	-0.212	-0.184	-0.367	-0.293
C_{X2}	—	—	0.42	0.42	0.378	0.367
C_{X3}	—	—	0.142	0.128	0.211	0.178
C_{X4}	0.762	0.779	0.349	0.363	0.221	0.252
M_{Z1}	$-0.506 \cdot 10^{-4}$	$-0.913 \cdot 10^{-2}$	$0.183 \cdot 10^{-3}$	-0.0154	$0.176 \cdot 10^{-3}$	-0.0124
M_{Z2}	—	—	$0.28 \cdot 10^{-4}$	-0.00382	$-0.302 \cdot 10^{-4}$	-0.00495
M_{Z3}	—	—	$-0.266 \cdot 10^{-4}$	0.00197	$-0.201 \cdot 10^{-4}$	$0.482 \cdot 10^{-3}$
M_{Z4}	$-0.506 \cdot 10^{-4}$	$-0.913 \cdot 10^{-2}$	$-0.184 \cdot 10^{-3}$	-0.0167	$0.126 \cdot 10^{-3}$	-0.0168
V_m	-0.0606	-0.102	-0.146	-0.31	-0.192	-0.27

П р и м е ч а н и е. C_X — коэффициент сопротивления, M_Z — коэффициент поперечного момента. Индексы 1–4 относятся к торцу цилиндра, передней стороне диска, задней стороне диска и к компоновке тела соответственно; m — минимальная величина.

использовании H -образных, в общем случае неортогональных, согласованных с поверхностью тела сеток с расположением узловых точек в плоскостях, перпендикулярных и параллельных направлению набегающего потока со сгущением их вблизи стенки и в зонах развития сдвиговых слоев, в данном исследовании применяется цилиндрическая, согласованная с омываемой поверхностью сетка. Это позволяет существенно (в пять и более раз) увеличить плотность ячеек в пределах передней отрывной зоны. Кроме того, чтобы избежать проблем, связанных с интерполяцией метрических коэффициентов, используется упрощенный подход на основе задания аналитической метрики. Во всех остальных подробностях методология данного исследования не отличается от изложенной в [4]. С помощью неявного конечно-объемного метода в рамках концепции расщепления по физическим процессам решается система уравнений Навье–Стокса, записанная в естественных переменных для декартовых составляющих скорости. На входной границе расчетной области задается равномерный поток. На выходных границах ставятся мягкие граничные условия (условия продолжения решения из внутренних точек на границу области). На твердых поверхностях выполняются условия прилипания. Расчет стационарного обтекания тела выполнен на сетке, содержащей $51 \times 66 \times 61$ ячеек. При этом в зазоре между диском и цилиндром сосредоточено порядка 30 тысяч расчетных узлов.

На рис. 1, 2 и в таблице последовательно сопоставляются расчетные результаты для ламинарного обтекания полубесконечного цилиндра при наличии (при $Re = 700$ и 1000) и в отсутствие (при $Re = 700$) перед ним диска при углах атаки 0 и 5°. Следует отметить, что полученные результаты коррелируют с приведенными в [4,5] решениями для осесимметричного ламинарного обтекания цилиндра с диском и данными визуализации отрывного течения в гидротрубе.

Размещение диска перед цилиндром приводит к существенной перестройке его обтекания, связанной с образованием передней срывной зоны (ПСЗ), и, как

следствие, к двукратному падению профильного сопротивления (C_{X4}). Как видно из рис. 1, a , в зазоре между диском и цилиндром при нулевом угле атаки возникает тороидальный вихрь, интенсивность возвратного течения (V_m) в котором составляет 15% от скорости набегающего потока. Низкое (отрицательное) давление в вихре, практически одинаковое по всей ПСЗ (рис. 2, a), обуславливает возникновение тянущей силы со стороны цилиндра (C_{X1}), что предопределяет эффект снижения сопротивления затупленных тел с выступающим диском. С ростом числа Re интенсивность отрывного течения возрастает, а профильное сопротивление существенно падает (более чем в три раза по сравнению с C_{X4} цилиндра).

При наличии (сравнительно малого) угла атаки обтекание цилиндра с диском приобретает весьма сложный пространственный характер. Деформация тороидального вихря происходит прежде всего в осевой плоскости, параллельной набегающему потоку. При этом вихрь становится резко неоднородным. Интенсификация возвратного течения с наветренной части (V_m возрастает вдвое и доходит до 30% от скорости набегающего потока) сочетается с ослаблением отрывного течения с подветренной стороны. Как следствие, деформации вихря происходят перераспределение локальных силовых нагрузок по торцевой стенке цилиндра, вызывающее возникновение значительного восстанавливающего момента M_{Z4} (головной стабилизации).

Сложная вихревая структура течения характеризуется возникновением струйных потоков в особых точках стекания типа фокуса на торце цилиндра (рис. 2, b), перетеканием жидкости с наветренной стороны тороидального вихря на подветренную и далее на боковую поверхность с всасыванием жидкости с подветренной стороны на наветренную сторону.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проектам № 95-01-00728 и 96-01-00298.

Список литературы

- [1] Белов И.А. Взаимодействие неравномерных потоков с преградами. Л.: Машиностроение, 1983. 144 с.
- [2] Белов И.А., Исаев С.А. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. Вып. 10. С. 608–611.
- [3] Koenig K., Roshko A. // J. Fluid Mech. 1985. Vol. 156. P. 167–204.
- [4] Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
- [5] Бобышев В.К., Исаев С.А., Лемко О.Л. // ИФЖ. 1986. Т. 51. № 2. С. 224–232.
- [6] Бобышев В.К., Исаев С.А. // ИФЖ. 1990. Т. 58. № 4. С. 556–572.
- [7] Исаев С.А. // ИФЖ. 1995. Т. 68. № 1. С. 19–25.
- [8] Белов И.А., Бобышев В.К., Исаев С.А. // Исследования по аэродинамике и динамике полета. Киев: КИИГА, 1988. С. 122–129.
- [9] Исаев С.А., Сумовский Н.А. // ИФЖ. 1997. Т. 70. № 6. С. 990–995.