

01;03

## **Численное моделирование ламинарного обтекания цилиндра с пассивными и активными вихревыми ячейками**

© П.А. Баранов, С.А. Исаев, Ю.С. Пригородов, А.Г. Судаков

Академия гражданской авиации, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 12 ноября 1997 г.

При решении факторизованным конечно-объемным методом уравнений Навье–Стокса в рамках концепции декомпозиции расчетной области и при использовании многоярусных сеток анализируются эффекты снижения лобового сопротивления цилиндра с пассивными и активными вихревыми ячейками различной геометрии.

Поиск рациональных способов управления обтеканием затупленных тел, ориентированный на формирование аэродинамического облика перспективных летательных аппаратов, стимулирует исследование в области синтеза известных комбинаций вдува и отсоса с формированием организованных вихревых пристенных течений с помощью вихревых ячеек. Использование активных (с подводом или отводом жидкости) и пассивных вихревых ячеек в принципе позволяет реализовать плавное безотрывное обтекание тела и существенно улучшить его характеристики.

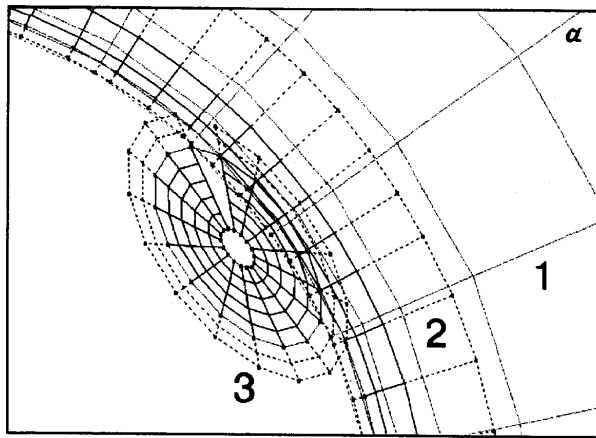
Управление обтеканием затупленных тел с помощью вдува и отсоса потока давно является одной из привлекательных проблем аэрогидромеханики. Широко известны управление пограничным слоем на крыле при отсосе потока, уменьшение донного сопротивления тел за счет вдува газа, выдув струи впереди тела с целью снижения его лобового сопротивления. Однако оценка эффективности такого рода устройств подчас затруднительна из-за сложности учета энергозатрат на реализацию вдува/отсоса. В то же время использование пассивных (без энергозатрат) способов управления течением с помощью выступающих насадков, проницаемых и непроницаемых преград также позволяет за счет организации крупномасштабных вихревых структур в окрестности тел существенно улучшить их аэродинамические характеристики. В частности, создание впереди тел вихревых ячеек или ловушек весьма

интенсивных вихрей способно привести к уменьшению профильного сопротивления затупленного тела на один-два порядка [1].

Представляется целесообразным скомбинировать указанные способы воздействия на обтекание тел и поставить задачу комплексной оптимизации управления потоком по критерию минимума сопротивления движению тел. Следует отметить, что рассматриваемая фундаментальная проблема по своей содержательной и методологической частям весьма актуальна, а получаемые результаты послужат для обоснования перспективных конструкций летательных аппаратов.

С помощью методов численного моделирования в данной работе впервые ставится и решается сопряженная задача о влиянии уловленных вихревых крупномасштабных структур на ламинарное обтекание потоком несжимаемой вязкой жидкости и на аэродинамическое сопротивление тела классической геометрии — кругового цилиндра — при наличии пассивных и активных вихревых ячеек различной формы и расположения относительно центра цилиндра. Рассматриваемые вихревые ячейки имеют эллиптическую форму с центральным телом такой же геометрии. Такой подход позволяет сконструировать алгоритм, основанный на конечно-объемном методе решения уравнений Навье–Стокса, в рамках известной концепции декомпозиции расчетной области при генерации в выделенных существенно разномасштабных подобластях многоярусных с перекрытием косоугольных сеток одного типа (О-типа). Система исходных уравнений записывается в дивергентной форме для приращений зависимых переменных: контравариантных составляющих скорости и давления. Такой подход аналогичен использованному в [2] и характеризуется более точным представлением потоков через грани расчетных ячеек.

Предложенная расчетная модель базируется на концепции расщепления по физическим процессам, реализуемой в процедуре коррекции давления SIMPLEC. Характерными особенностями такого итерационного алгоритма являются определение на шаге "предиктор" предварительных составляющих скорости для "замороженных" полей давления, и последующая коррекция давления на базе решения уравнения неразрывности с поправками поля скорости. Вычислительный процесс конструируется таким образом, что на один шаг "предиктор" приходится несколько локальных итерационных шагов в блоке коррекции давления. Применяется метод глобальных итераций по подобластям с последующей интерполяцией зависимых переменных в зонах перекрытия подобластей.



**Рис. 1.** Фрагмент композитной сетки (а), состоящей из двухъярусной (1,2) сетки около цилиндра и сетки в вихревой ячейке (3), картины обтекания цилиндра без ячейки (b), с пассивной круговой ячейкой (c) диаметра 0.2 с круговым центральным телом диаметра 0.04, смещенной на 0.2 от центра цилиндра, и с активной ячейкой такой же геометрии (d) при задании тангенциальной компоненты скорости на поверхности каверны, равной 0.3. Линии тока нанесены с шагом 0.0007 от  $-0.015$  до  $0.015$ .

Выбор центрированного шаблона с привязкой зависимых переменных к центру расчетной ячейки обусловлен стремлением упростить расчетный алгоритм и уменьшить количество вычислительных операций. Монотонизация поля давления в рамках данного подхода осуществляется на базе методики Рхи–Чоу. Высокая устойчивость вычислительной процедуры обеспечивается применением для дискретизации конвективных членов в неявной части уравнений для приращений искомых переменных односторонних противопоточных разностей, демпфированием нефизических осцилляций за счет введения искусственной диффузии в неявной части уравнений и использованием псевдовременных стабилизирующих членов. Также повышает вычислительную эффективность расчетного алгоритма метод неполной матричной факторизации в версии Стоуна (SIP) для решения систем нелинейных алгебраических уравнений. Приемлемая точность процедуры определяется дискретизацией явной части уравнений по схеме второго порядка аппроксимации и, в

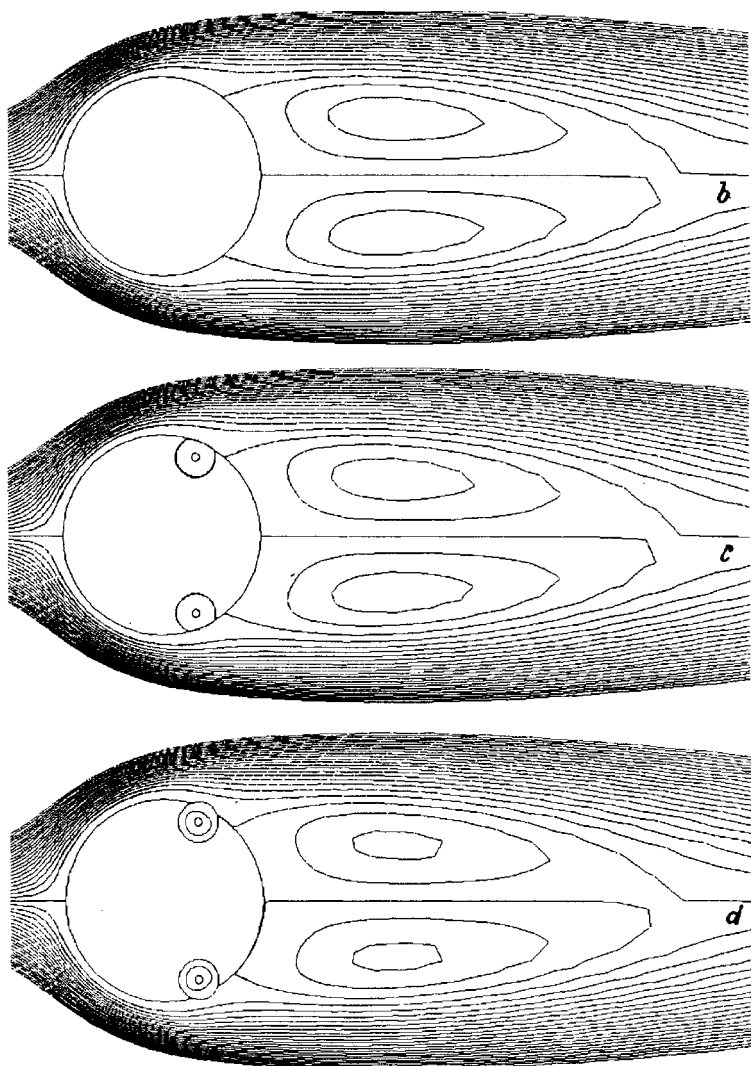
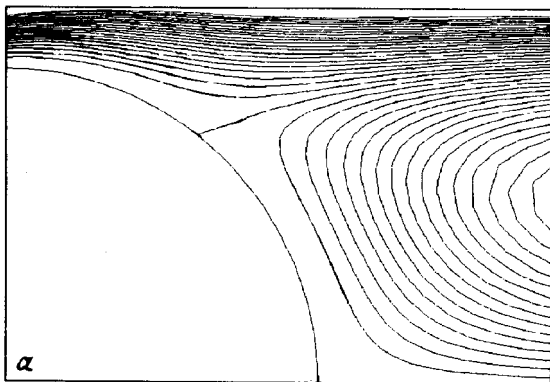


Рис. 1 (продолжение).



**Рис. 2.** Фрагменты обтекания гладкого цилиндра (*a*), цилиндра с пассивными ячейками: эллиптической (*b*), круговой (*c*) формы, смещенными относительно центра цилиндра на 0.4; и круговой (*d*) формы, смещенной относительно центра цилиндра на 0.2; и цилиндра с активными ячейками: эллиптической формы (*e*) при задании нормальной и тангенциальной скорости вдува, равными 0.1, на поверхности центрального тела; круговой формы (*f, g*) при задании тангенциальной скорости на поверхности каверны, равной 0.3. Линии тока нанесены с шагом 0.0001 от  $-0.002$  до  $0.002$ .

частности, конвективных членов уравнений по квадратичной противопоточной схеме Леонарда (QUICK). Указанная методология позволяет минимизировать влияние эффектов "численной" диффузии, особенно существенных при расчете отрывных течений. Детали расчетной процедуры содержатся в [1].

Для решения данной задачи ламинарного обтекания цилиндра с вихревыми ячейками при низком числе Рейнольдса  $Re = 40$  для более точного разрешения разномасштабных структурных элементов представляется целесообразным выделить отдельно пристеночную область толщиной примерно 0.1 диаметра цилиндра (выбирается в качестве характерного размера) и внешнюю кольцевую зону, внешняя граница которой располагается на достаточном удалении (порядка 50–100) от тела. Введением нескольких кольцевых зон (рис. 1, *a*) или эквивалентно построение многоярусных сеток связано с ускорением сходимости решения задачи за счет уменьшения потребного количества расчетных ячеек. Можно сформулировать требование к взаимному расположению зон: область наложения соседних зон должна включать порядка 3–4 ячеек

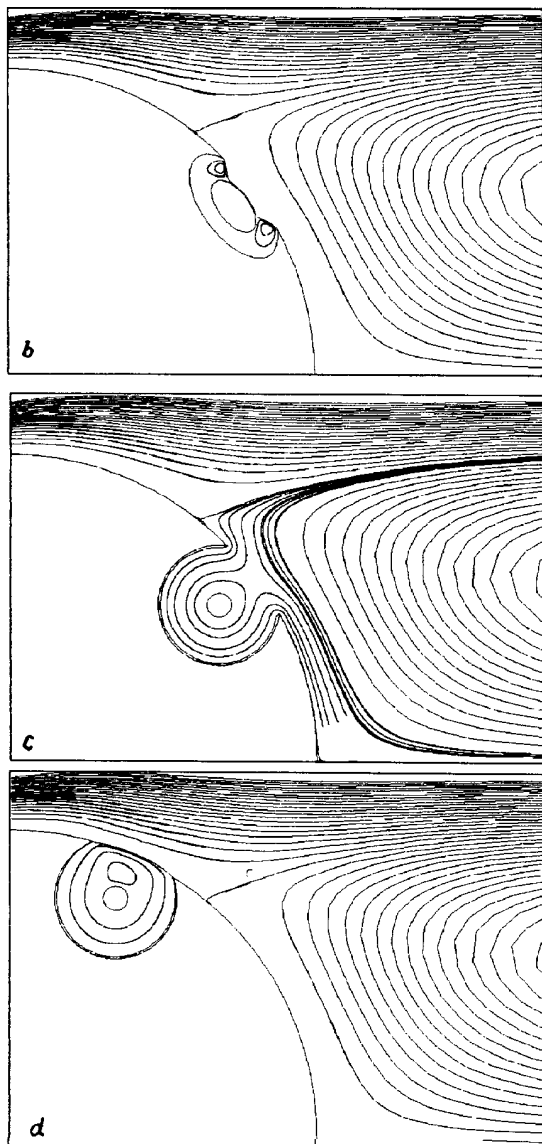


Рис. 2 (продолжение).

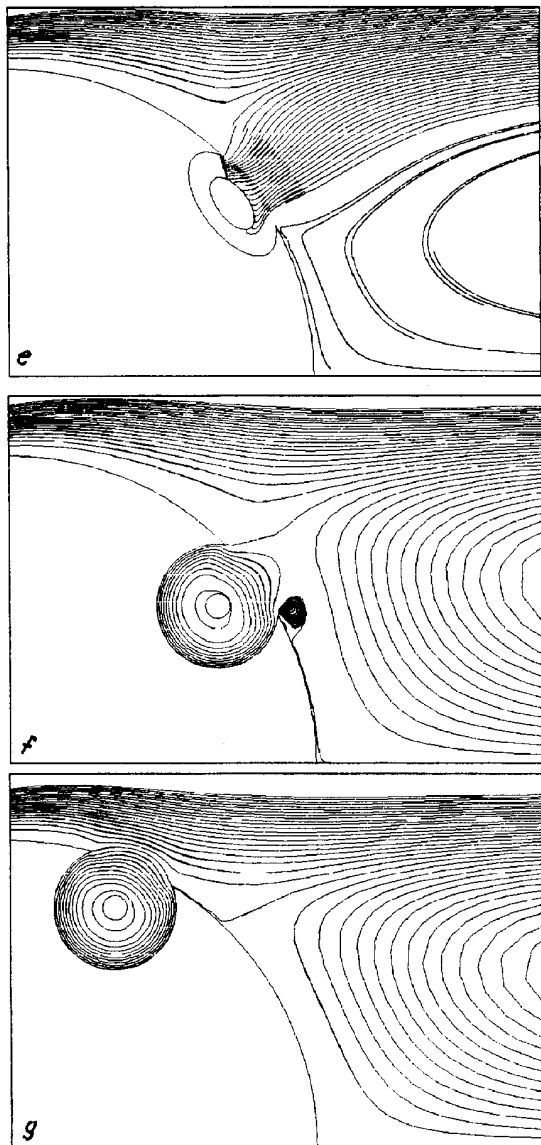


Рис. 2 (продолжение).

каждой зоны, так что суммарно область перекрытия содержит порядка 6–8 расчетных ячеек. Если это требование нарушается и количество ячеек меньше указанного, то нарушается процесс передачи информации между зонами. В противном случае, когда количество ячеек в области перекрытия завышено, возникает неоправданный перерасход вычислительных ресурсов. В данном исследовании количество узлов во внешней зоне —  $120 \times 80$ , в пристеночной зоне —  $200 \times 11$ . Шаг у стенки — 0.002.

Внутри вихревых ячеек сетка строится равномерно по дуге и радиусу (в расчетах — 21 в каждом из направлений). Задается количество точек на срезе каверны. Общее количество точек в окружном направлении рассчитывается затем из условия одинаковости углового шага. Продольный размер вихревой ячейки принимается равным 0.2. Максимальный размер центрального тела в случае эллиптической ячейки (отношение полуосей 2 к 1) — 0.1. Для вихревых ячеек круговой формы центральное тело имеет диаметр 0.04. Во всех случаях ячейки располагаются внутри цилиндра с заглублением 15% от поперечного размера ячейки. Рассматриваются два варианта размещения ячеек — до точки отрыва и после точки отрыва потока при обтекании гладкого цилиндра (рис. 2). Активизация ячеек осуществляется с помощью задания нормальной и тангенциальной скорости потока на поверхностях каверны и центрального тела. В данном исследовании эллиптическая ячейка активизируется за счет вдува на центральном теле (интенсивность вдува задается равной 0.1 по обеим компонентам скорости). Круговые ячейки активизируются при задании тангенциальной скорости течения на поверхности каверны, равной 0.3 (подкрутка вихря по направлению внешнего потока).

Из представленных на рис. 1, 2 и в таблице результатов следует, что пассивные вихревые ячейки различных размеров и расположения не в состоянии при выбранном числе Рейнольдса оказать существенное влияние на картину обтекания кругового цилиндра (течение внутри них почти отсутствует). Активизация с помощью вдува из центрального тела приводит к возникновению струйного потока из эллиптической ячейки, перераспределению локальных нагрузок на цилиндр и в целом к снижению интегрального лобового сопротивления. Более интересным, на наш взгляд, представляется активизация течения в круговой ячейке за счет интенсификации вихря и передачи импульса внешнему течению. В этом случае расположение вихревой ячейки относительно точки отрыва оказывает заметное влияние на картину обтекания цилиндра и



Сопоставительный анализ коэффициентов сопротивления и их составляющих для цилиндра с вихревыми ячейками различной формы и расположения при  $Re = 40$

	Цилиндр без ячеек	Пассивные ячейки			Активные ячейки		
		эллиптическая за точкой отрыва	круговая за точкой отрыва	круговая до точки отрыва	эллиптическая за точкой отрыва	круговая за точкой отрыва	круговая до точки отрыва
$C_x$	1.5284	1.5288	1.5279	1.5234	1.3600	1.4775	1.4332
$C_{xp}$	0.9869	0.9858	0.9851	0.9994	0.4454	0.8442	0.7775
$C_{xf}$	0.5415	0.5430	0.5428	0.5241	0.9145	0.6333	0.6558
$C_{xc}$	—	1.3947	1.3946	1.4221	1.4507	1.4153	1.4451
$C_{xpc}$	—	0.8498	0.8497	0.8945	0.9047	0.8540	0.8877
$C_{xpc}$	—	0.5448	0.5449	0.5277	0.5460	0.5613	0.5574
$C_{xpc}$	—	0.0684	0.0670	0.0543	-0.7560	0.0074	-0.0378
$C_{xpc}$	—	0.0685	0.0679	0.0549	-0.8295	-0.0201	-0.0751
$C_{xpc}$	—	-0.0001	-0.0009	-0.0005	0.0735	0.0275	0.0373
$C_{xpc}$	—	-0.0014	-0.0003	-0.0037	0.7103	0.0232	0.0318
$C_{xpc}$	—	-0.0005	-0.0001	-0.0024	0.5995	0.0146	0.0199
$C_{xpc}$	—	-0.0008	-0.0001	-0.0013	0.1108	0.0086	0.0117

Индексы  $x, xp, xf$  обозначают коэффициенты лобового сопротивления, сопротивления давления и сопротивления трения для цилиндра с вихревыми ячейками;  $c, pc, pt$  — обозначают вклады в соответствующие коэффициенты сопротивления цилиндра, поверхности вихревой ячейки и центрального тела соответственно.

коэффициент лобового сопротивления. Размещение круговой ячейки в зоне более интенсивного течения (рис. 2,  $g$ ) позволяет в большей мере снизить сопротивление цилиндра.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проектам № 96-01-01290 и 96-01-00298.

## Список литературы

- [1] Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.
- [2] Карякин Ю.Е., Карякин В.Е., Мартыненко О.Г. // Препринт № 1. Минск, ИТМО им. Лыкова, 1991. 44 с.