

01;03

Идентификация самоорганизующихся смерчеобразных структур при численном моделировании турбулентного обтекания лунки на плоскости потоком вязкой несжимаемой жидкости

© С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, П.А. Баранов

Академия гражданской авиации, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 3 сентября 1999 г.

При решении факторизованным конечно-объемным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью низкорейнольдсовой диссипативной модели турбулентности Ментера, анализируется генерация смерчеобразных структур при отрывном турбулентном обтекании глубокой лунки на плоскости и обсуждается эффект вихревой интенсификации за счет придания лунке асимметричной формы.

В решении проблемы вихревой интенсификации тепломассообменных процессов, обусловленной генерированием самоорганизующихся вихревых структур при обтекании низкоскоростным потоком криволинейных рельефов, в частности сферических лунок, наметился определенный прогресс. Он связан с развитием и использованием методов численного моделирования. Недавно в [1] предложен упрощенный подход к численному анализу стационарных пространственных вихревых структур в сферической лунке при ее ламинарном обтекании потоком вязкой несжимаемой жидкости. Его характерными элементами являются использование цилиндрических сеток с высокой плотностью сеточных ячеек в лунке и аналитическое представление метрических коэффициентов, позволяющее избежать их интерполяции и повысить точность решения. В рамках развитого подхода в [1–5] идентифицированы управляющие струйно-вихревые структуры, ответственные за массоперенос в пространственной отрывной зоне, в том числе замкнутые вихревые кольца. В [6] на основе кодов CFL3D сделана попытка рассчитать

турбулентное течение в канале с нанесенными на одной из стенок рядами сферических лунок.

В данном численном исследовании центральное место уделено детальному анализу управляющего механизма генерации вихрей в турбулентном пристеночном потоке несжимаемой вязкой жидкости в окрестности уединенной вогнутости на гладкой стенке с учетом влияния асимметрии формы. Как и в [1], идентификация пространственных струйно-вихревых структур осуществлена методом компьютерной визуализации течения на основе наблюдения за треками меченых жидких частиц. В качестве базовой геометрии рассматривается сферическая лунка (глубиной 0.22) со скругленными кромками (радиусом 0.1), для которой реализуется режим устойчивого турбулентного обтекания с образованием развитой отрывной зоны.

В отличие от [1–5], при численном моделировании турбулентного течения в окрестности криволинейного рельефа развивается апробированный при решении двумерных задач обтекания тел с вихревыми ячейками (см., например, [7]) подход, базирующийся на использовании многоблочных сеток. Сконструированный факторизованный алгоритм основывается на неявном конечно-объемном методе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, замкнутых с помощью низкорейнольдсовой двухпараметрической диссипативной модели турбулентности Менстера [8], в рамках концепции декомпозиции расчетной области и генерации в выделенных существенно разномасштабных подобластях косоугольных сеток H- и O-типа с перекрытием. Система исходных уравнений записывается в дивергентной форме для приращений зависимых переменных, в состав которых входят, в частности, декартовы составляющие скорости. При аппроксимации источниковых членов конвективные потоки рассчитываются с помощью одномерной противопоточной схемы UMIST, представляющей разновидность TVD-схемы [9]. В целом методология данного исследования не отличается от изложенной в [10].

Для решения задачи турбулентного обтекания глубокой лунки для более точного разрешения разномасштабных, структурных элементов течения, таких как сдвиговый слой, зона возвратного течения, представляется целесообразным выделить отдельно окружающую лунку пристеночную область кольцевой цилиндрической формы с внешним радиусом 1 (все линейные размеры отнесены к диаметру лунки), внутренним радиусом 0.1 и высотой 0.175. Рассматриваемая область разбивает-

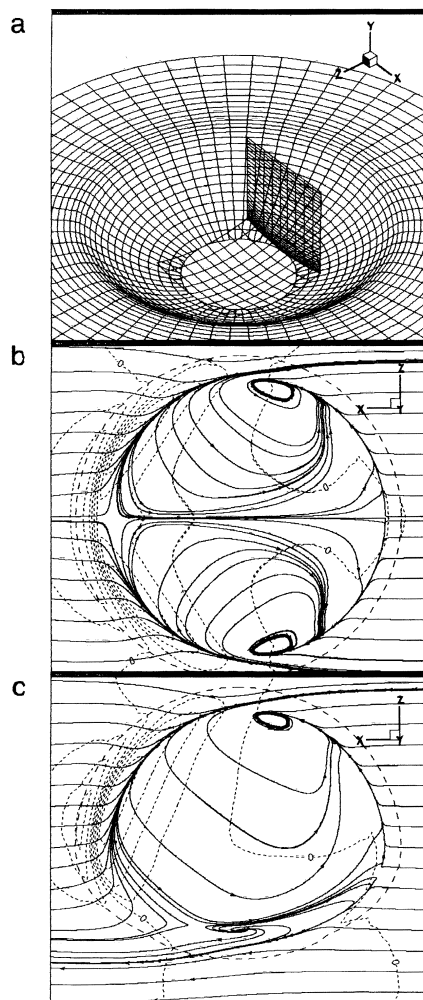


Рис. 1. Фрагмент многоблочной пространственной сетки в окрестности сферической лунки глубиной 0.22 (a), сравнение картин растекания жидкости по поверхности сферической (b) и асимметричной (c) лунок с нанесенными пунктирными линиями изобарами с шагом 0.02. Цифрой 0 помечен нулевой уровень избыточного давления.

ся косоугольной криволинейной сеткой, согласованной с омываемой поверхностью (рис. 1). По окружности выбирается 60 равномерно распределенных ячеек, в вертикальном направлении — от 30 до 45 ячеек с концентрацией узлов вблизи стенки (минимальный пристеночный шаг варьировался от 0.0008 до 0.005). В радиальном направлении задается от 30 до 45 ячеек, размещенных со сгущением к границе лунки (минимальный шаг — 0.015).

Рассматриваемая подобласть лунки накрывается крупномасштабной прямоугольной областью, основание которой частично совпадает с омываемой потоком плоской стенкой. Начало декартовой системы координат совпадает с проекцией на плоскость центра лунки. Длина области составляет 17, высота — 5, ширина — 10. Указанная область разбивается декартовой сеткой, содержащей $55 \times 35 \times 40$ ячеек. Узлы сетки концентрируются в окрестности лунки (минимальный шаг в продольном и поперечном направлениях — 0.15) и вблизи стенки (пристеночный шаг варьируется от 0.001 до 0.005).

Для лучшего разрешения пристеночного течения в окрестности оси цилиндрической подобласти вводится пересекающая эту подобласть "заплата" (рис. 1, *a*), имеющая форму криволинейного параллелепипеда. В ее пределах строится сетка с равномерным распределением узлов в продольном и поперечном направлениях. Шаги этой сетки согласуются с приграничным шагом сетки соседней цилиндрической области. Также увязывается расположение узлов сетки в вертикальном направлении.

Проанализировано обтекание двух лунок: сферической формы и асимметричной геометрии, представляющей соединение сферической и эллиптической (с отношением полуосей 0.3 к 0.5) конфигураций (рис. 1, *b, c*).

На входной границе области задается профиль скорости, соответствующий профилю "1/7" для турбулентного пограничного слоя с толщиной, близкой к глубине лунки (0.175). На выходных границах ставятся мягкие граничные условия (условия продолжения решения). На стенке выполняется условие прилипания. В качестве параметров безразмеривания задаются скорость набегающего потока вне пограничного слоя и диаметр лунки. Число Рейнольдса принимается равным $2.35 \cdot 10^4$.

На рис. 1, 2 представляются некоторые из численных результатов, полученных с помощью системы компьютерной визуализации пространственных полей TЕСPLOT.

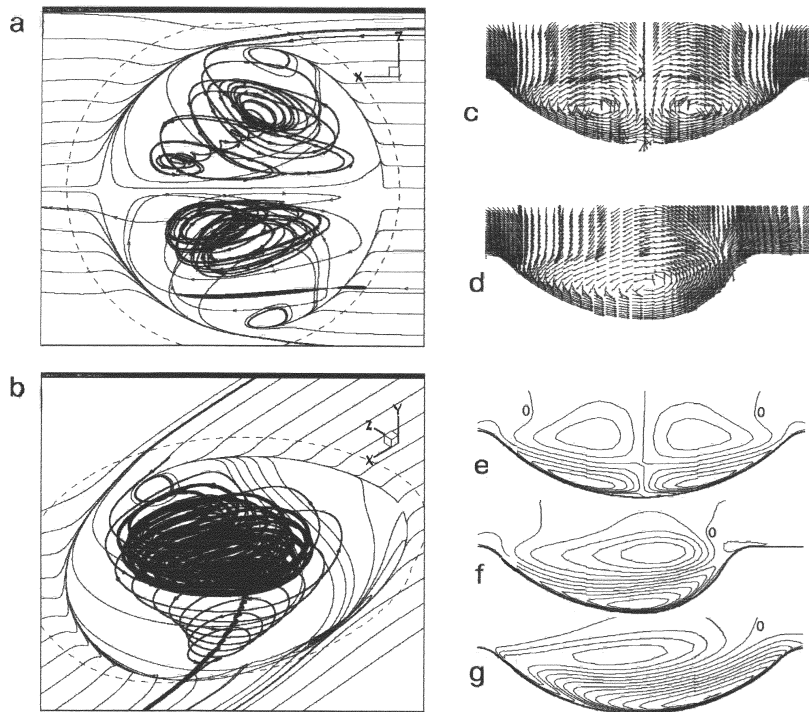


Рис. 2. Компьютерная визуализация струйно-вихревых структур в сферической (а) и асимметричной (b) лунках, картины векторов скорости и картины изолиний поперечной составляющей скорости в срединном поперечном ($x = 0$) сечении сферической (c, e) и асимметричной (d, f) лунок, а также картина изолиний поперечной составляющей скорости (g) в продольной ($z = 0$) плоскости для асимметричной лунки. Изолинии нанесены с шагом 0.02, начиная от нулевого уровня.

Показанная на рис. 1, b картина растекания пристеночного турбулентного потока по поверхности симметричной глубокой лунки, так же как и при ламинарном режиме течения [1], характеризуется наличием особых точек типа "фокус", расположенных на периферийных частях лунки. Однако в отличие от ламинарного обтекания в турбулентном

Интегральные силовые характеристики, действующие на круговой элемент стенки (радиуса 1) с лункой

| Лунка | C_x | C_y | C_z |
|---------------|--------|-----------|---------|
| Сферическая | 0.2012 | -0.007475 | 0.00013 |
| Асимметричная | 0.1575 | -0.001167 | 0.00091 |

C_x , C_y , C_z — лобовая, вертикальная и поперечная силы, действующие на круговой элемент с лункой.

режиме отрывная зона оказывается разомкнутой, причем через открытые боковые окна набегающий поток попадает внутрь лунки, приводя к существенной интенсификации вихревого движения жидкости. Следует отметить, что максимальная скорость возвратного течения в лунке, равная 0.24, при $Re = 2.35 \cdot 10^4$ оказывается в 4 раза выше, чем при $Re = 2500$.

Для рассматриваемой асимметричной лунки (рис. 1, *с*) картина растекания приобретает ярко выраженный несимметричный характер со скосом потока в сторону ее деформированной части и смещением максимума давления в противоположную сторону. Если на сферической части такой лунки картина примерно такая же, как для симметричной лунки, то на эллиптической части структура течения изменяется кардинальным образом. Особая точка на этом склоне лунки является не источником, как в симметричном случае, а стоком. В целом структура крупномасштабного вихревого течения в пределах асимметричной лунки имеет улиткоподобный вид. Это отчетливо проявляется при траекторном анализе меченых частиц, вводимых в различных точках пространства.

Формирующаяся в сферической лунке симметричная смерчеобразная структура обладает высокими эжекционными способностями, втягивая частицы жидкости из набегающего потока (на рис. 2, *а* показана одна из траекторий, проходящая через точку с координатами $x = -0.1$, $y = -0.1$, $z = 0.2$), и имеет слоистую природу. Так, в закрученные струйные потоки, выходящие из особых точек на поверхности лунки, оказываются встроенными крупномасштабные вихревые кольца, частицы в которых совершают возвратно-поступательное движение (см.

траекторию жидкой частицы, проходящую через точку с координатами $x = -0.1, y = -0.1, z = -0.1$).

В асимметричной лунке реализуется лишь одна струйно-вихревая структура (рис. 2, *b*). Вихревое кольцо, сформированное пересекающей точку ($x = -0.1, y = -0.1, z = 0.1$) траекторией меченой частицы, обтекается струйным потоком, в частности, состоящим из жидких частиц набегающего потока (см., например, траекторию частицы, проходящую через точку с координатами $x = -0.25, y = -0.1, z = 0.25$).

Перестройка вторичного течения от структуры с двумя крупномасштабными вихревыми ячейками в сферической лунке к одновихревой структуре в асимметричной лунке наиболее наглядно предстает при сравнении картин векторов скорости в поперечном срединном сечении лунки на рис. 2, *c, d*. Количественно эта перестройка выражается в интенсификации вторичного течения, т.е. в существенном увеличении (более чем вдвое) поперечной скорости (рис. 2, *e, f, g*) для асимметричной вихревой структуры. Впрочем, этот факт согласуется с обнаруженным в [11] усилением вихря при несимметричном вдуве струи в турбулентный пограничный слой. Также важно отметить (см. таблицу) уменьшение лобового сопротивления круговой части стенки с лункой и появление поперечной силы для лунки асимметричной геометрии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проектам № 99-01-00722 и 99-02-16745.

Список литературы

- [1] Исаев С.А., Леонтьев А.И., Фролов Д.П. и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 6. С. 6–12.
- [2] Isaev S.A., Baranov P.A., Usachev A.E. et al. // Proc. 8th Int. Symp. on Flow Visualization. Sorrento, 1998. P. 217.1–217.8.
- [3] Isaev S.A., Baranov P.A., Usachev A.E. et al. // Proc. Fourth ECCOMAS CFD Conf. Athens. Greece, 1998. V. 1. Pt. 2. P. 768–774.
- [4] Исаев С.А., Леонтьев А.И., Усачев А.Е. и др. // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: МЭИ, 1998. С. 121–124.
- [5] Исаев С.А., Леонтьев А.И., Усачев А.Е. и др. // Изв. РАН. Энергетика. 1999. № 2. С. 126–136.
- [6] Lin Y.-L., Shih T.I.-P., Chyu M.K. // ASME Paper. 1999. № 99-GT-263. 6 p.

- [7] Баранов П.А., Исаев С.А., Пригородов Ю.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 8. С. 33–41.
- [8] Menter F.R. // AIAA J. 1994. V. 32. N 8. P. 1598–1605.
- [9] Lien F.S., Chen W.L., Leschziner M.A. // Int. J. Numer. Meth. Fluids. 1996. V. 23. P. 567–588.
- [10] Баранов П.А., Исаев С.А., Пригородов Ю.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 17. С. 16–23.
- [11] Henry F.S., Pearcey H.H. // AIAA J. 1994. V. 32. N 12. P. 2415–2425.