



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

И. А. Белов, С. А. Исаев, А. Ю. Митин,
В. Н. Коновалов, Применение концепции
идеальной жидкости для расчета отрыв-
ного обтекания затупленных тел с учетом
турбулентного сдвигового слоя на грани-
це области отрыва, *Письма в ЖТФ*, 1984,
том 10, выпуск 20, 1217–1220

Использование Общероссийского математического портала
Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны
с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.171

18 марта 2025 г., 07:54:31



ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ
ДЛЯ РАСЧЕТА ОТРЫВНОГО ОБТЕКАНИЯ
ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛ С УЧЕТОМ
ТУРБУЛЕНТНОГО СДВИГОВОГО СЛОЯ
НА ГРАНИЦЕ ОБЛАСТИ ОТРЫВА

И.А. Белов, С.А. Исаев,
А.Ю. Митин, В.Н. Коновалов

Получившая в последние годы признание идея о применимости концепции идеальной жидкости в вычислительном эксперименте, связанном с расчетом сверхзвукового обтекания тел при предельно больших числах Рейнольдса, в том числе с отрывом потока, нашла воплощение в разработке адаптирующихся к особенностям течения алгоритмов и, как следствие, поиске решения в подобластях гладкого поведения газодинамических параметров. Примером такого рода решений служит работа [1], в которой на основе нестационарной схемы Годунова использован лагранжево-эйлеров подход к построению расчетной сетки, адаптирующейся как к головной ударной волне, так и к поверхности тангенциального разрыва, возникающих при движении со сверхзвуковой скоростью тела с передней срывной зоной, типа изображенного на рис. 1,а. Альтернативный подход к расчету обтекания таких или подобных тел в условиях отрыва потока, включая расчет ближнего следа за телом, принят в ряде других работ (см., например, [2, 3]), где на основе нестационарных разностных схем крупных частиц и Годунова на неподвижных сетках получены решения задач без выделения структурных особенностей течения. Различие указанных подходов заключается прежде всего в том, что если в первом случае практически исключается обмен количеством движения и энергией между внешним потоком и циркуляционным течением, возникающий в реально существующем сдвиговом слое (рис. 1,а) на границе области отрыва, то во вто-

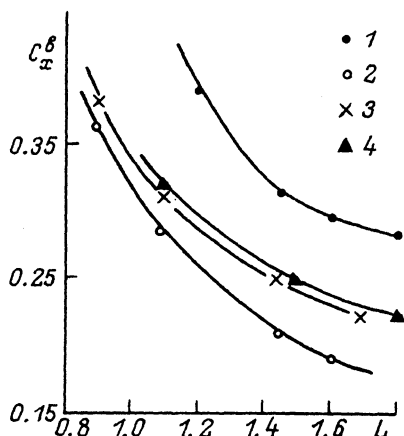
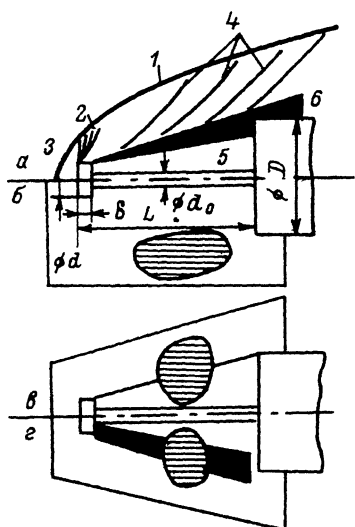


Рис. 1. Схема обтекания компоновки диск-цилиндр (а) с указанием основных структурных элементов: 1 - головная ударная волна; 2 - вееры разрежения; 3 - звуковая линия; 4 - волны сжатия; 5 - отрывная зона; 6 - турбулентный сдвиговый слой. Расчетные области с прямоугольной сеткой (б), косоугольной сеткой (в), косоугольной сеткой с наложенным турбулентным сдвиговым слоем (г).

Рис. 2. Зависимость коэффициента волнового сопротивления C_x^b компоновки от выступа диска L . 1 - расчет на прямоугольной сетке; 2 - расчет на косоугольной сетке; 3 - эксперимент; 4 - расчет с наложением турбулентного сдвигового слоя.

ром случае перенос количества движения и энергии обусловлен действием механизма искусственной диффузии, величина которой зависит от схемной вязкости, определяемой, как установлено, например, в [4], процессами конвекции в сдвиговом слое и скосом потока относительно граней ячеек расчетной сетки.

Для определения влияния на решение вязких эффектов и оценки адекватности механизмов турбулентной и искусственной диффузии проведено численное и экспериментальное исследование осесимметричного обтекания цилиндра $D = 1$ с вынесенным на расстояние L перед ним диском диаметра $d = 0.23$ и толщины $\delta = 0.07$ (диаметр соединительной перемычки d_0 выбран равным 0.1) сверхзвуковым потоком с числом Маха $M = 4.15$. Число Рейнольдса в эксперименте, построенное по параметрам невозмущенного потока и диаметру цилиндра, равно $1.6 \cdot 10^6$. Численное решение задачи,

соответствующее стационарному режиму обтекания тела, получено в процессе установления во времени с помощью нестационарного метода Годунова [5], используя два типа расчетных сеток: прямоугольную, согласованную с поверхностями обтекаемого тела сетку (рис. 1,б) и косоугольную сетку, со сгущением сеточных линий в окрестности опорной линии, соединяющей острые кромки диска и цилиндра (рис. 1,в). Граничные условия поставлены обычным образом [2].

При использовании прямоугольных сеток сдвиговой слой, развивающийся на границе циркуляционного течения с внешним потоком, пересекает грани расчетных ячеек и несомненно в большой степени формируется под действием механизма искусственной диффузии. Сетки с косоугольными ячейками подобраны таким образом, чтобы ориентировать продольные грани ячеек в области сдвигового слоя, по возможности, параллельно вектору скорости потока и, следовательно, уменьшить влияние искусственной диффузии. Отметим, что в последнем случае верхняя граница расчетной области наклонена к оси симметрии с целью уменьшения размазывания криволинейной головной ударной волны.

Как видно из сопоставленных на рис. 2 расчетных и экспериментальных зависимостей коэффициента волнового сопротивления C_x^b рассматриваемых компоновок от выступающего диска L , решение задачи существенно зависит от выбора расчетной сетки. Значительное рассогласование C_x^b при переходе от косоугольной сетки к прямоугольной несомненно обусловлено влиянием механизма искусственной диффузии из-за различия в величинах схемной вязкости, реализующихся на использованных расчетных сетках. В расчетах на косоугольной сетке почти полное исключение искусственной диффузии в области смешения потоков приводит к резкому ослаблению течения в области между диском и цилиндром. Решение задачи в этом случае аналогично решениям, получаемым при использовании адаптирующихся алгоритмов, и описывает течение идеальной жидкости с выделением тангенциального разрыва с почти застойной областью между диском и цилиндром. Коэффициент волнового сопротивления компоновки оказывается ниже экспериментально определенного, что указывает на существенное влияние турбулентного переноса в сдвиговом слое на распределение силовых нагрузок на тело. В то же время в расчетах на прямоугольной сетке получен более высокий по сравнению с экспериментальным уровень силовых нагрузок на тело. Таким образом, несмотря на сходство (наличие сдвигового слоя) моделируемого течения и его физического аналога, количественное рассогласование расчетных и экспериментальных результатов указывает на неадекватность механизмов искусственной и турбулентной диффузии.

Очевидно, что преодолеть затруднения оставаясь в рамках модели идеальной жидкости не представляется возможным и необходимо, по крайней мере, учесть особенности, присущие турбулентному течению в сдвиговом слое. Логично, что реализация такого „гибридного“ подхода может быть осуществлена путем выделения в процессе

расчета сдвигового слоя и рассмотрения в нем турбулентного (по сути, а не по названию) движения жидкости с последующим сшиванием решения в сдвиговом слое и вне его, где используется рассмотренный ранее подход (рис. 1, г). Описание турбулентного движения жидкости в сдвиговом слое предусматривает обращение к системе уравнений Рейнольдса, замыкаемой с помощью той или иной модели турбулентности. Стремление к построению достаточно простых и нетрудоемких алгоритмов обусловило выбор полуэмпирической конвективной модели турбулентности, предложенной Прандтлем. Для уменьшения влияния на решение искусственной диффузии в сдвиговом слое использована сетка, адаптированная в достаточной степени к разделяющей циркуляционное течение и внешний поток линии тока (рис. 1, г). Априорное задание ограничивающих сдвиговой слой линий, симметрично расположенных относительно опорной линии, основано на автомоделных решениях для турбулентных сдвиговых слоев [6] и обработке данных по оптической визуализации течения. Эмпирические константы, определяющие турбулентную вязкость и толщину сдвигового слоя, выбраны равными 0.015, 0.085 соответственно.

Хорошее согласование рассчитанных таким образом коэффициентов сопротивления компоновок с экспериментальными значениями (рис. 2) указывает на существенное повышение качества моделирования обтекания тел с передней срывной зоной и позволяет обобщить предложенный „гибридный“ подход на класс задач отрывного обтекания тел достаточно произвольной формы, включая задачу расчета течения в ближнем следе за телом.

Л и т е р а т у р а

- [1] Забродин А.В., Черкашин В.А. — Препринт Ин. прикл. матем. им. М.В. Келдыша, 1980, № 73.
- [2] Белов И.А. Взаимодействие неравномерных потоков с преградами, Л.: Машиностроение, 1983.
- [3] Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982.
- [4] Leschziner M.A. — Comp. Meth. Appl. Mech. and Eng., 1980, 23, 3.
- [5] Численное решение многометных задач газовой динамики. Под ред. С.К. Годунова, М.: Наука, 1976.
- [6] Рейнольдс А.Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях, М.: Энергия, 1979.

Ленинградский
механический институт

Поступило в Редакцию
8 июня 1984 г.