

03

Воздействие импульсно-периодического энергоисточника на режимы обтекания тела сверхзвуковым потоком

© В.Н. Зудов

Институт теоретической и прикладной механики, Новосибирск
E-mail: zudov@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 2 сентября 2008 г.

Рассмотрена двумерная нестационарная задача о взаимодействии следа от импульсно-периодического энергоисточника с телом, размещенным в сверхзвуковом потоке. Проведено сравнение экспериментальных и численных данных.

PACS: 47.40.Ki, 52.50.Jm

Исследования воздействия источника энерговыделения на сверхзвуковой поток, а следовательно и на тело, находящееся в следе за источником, является сложной комплексной задачей, которая включает в себя несколько самостоятельных задач. К их числу можно отнести следующие исследования: взаимодействия ударных волн в газе с переменными параметрами; явления исчезновения ударной головной волны; изменения динамики ударных волн при прохождении их через область объемного энерговыделения и очень много других задач [1–4]. Источник энерговыделения в конкретном случае может рассматриваться как средство управления обтеканием летательного аппарата (ЛА), а следовательно и одним из способов создания дополнительных аэродинамических усилий, действующих на ЛА. Несимметрично организованный энергоподвод относительно оси симметрии позволяет получить подъемную силу при нулевом угле атаки.

Отличие предлагаемого исследования заключается в следующем: во-первых, основное внимание уделено формированию и развитию структуры следа за источником энерговыделения; во-вторых, проведено численное моделирование реального эксперимента; в-третьих, проведено сравнение численного моделирования и физического эксперимента. В сверхзвуковом потоке находится тело, которое имело форму цилиндра с конической (полный угол 60°) головной частью; полная длина

тела 20 mm, диаметр 6 mm; ось конуса параллельна вектору скорости набегающего потока. Вверх по потоку относительно тела имеются цилиндрический источник, импульсно-периодический энергоисточник, причем оси симметрии источника и конуса совпадают. Считается, что скорость набегающего потока относительно конуса постоянна, а мощность источника во времени меняется по заданному закону и зависит также от его положения в пространстве. Требуется определить структуру следа за энергоисточником и мгновенные и осредненные силы, действующие на конус.

Численное моделирование полученного в эксперименте явления [1] проведено в рамках осесимметричных, нестационарных уравнений Эйлера с показателем адиабаты $\gamma = \text{const}$. Энергоподвод к потоку моделировался источником членом в уравнении энергии [5,6]. Для решения рассматриваемой системы уравнений применен метод Годунова. Определение численных потоков на гранях вычислительной ячейки (т.е. решение задачи Римана) проведено с использованием метода HLLEM [5,6]. Численные расчеты выполнены с использованием TVD-схемы и разработанных неотражающих краевых условий. Расчеты проводились на сетке с числом узлов 700×300 .

Поскольку целью данной работы было построение математической модели полученного в эксперименте физического явления, то одним из основных принципов данной работы было максимальное использование информации, полученной в эксперименте, а также заложенной в качестве исходных данных для проведения эксперимента. Поэтому все ниже приведенные исходные данные соответствуют условиям эксперимента [1].

В сверхзвуковом потоке с числом Маха $M_\infty = 2$ находится осесимметричный импульсно-периодический энергоисточник. Цилиндрический энергоисточник имеет следующие геометрические размеры: длина его равна 8.5 mm, а радиус 1 mm. Начало энергоисточника расположено в точке с координатой $x = 0$. В эксперименте были реализованы следующие параметры набегающего газового потока (был использован аргон): давление $P = 56 \text{ kPa}$; температура 130 K. Время выделения энергии 10^{-6} s . Подведенная в одном импульсе энергия равна 0.04 J. Эксперимент проводился в диапазоне частот следования импульсов, равном 12–100 kHz. Расчеты были проведены в этом же диапазоне частот. Предполагается, что набегающий газ аргон с $\gamma = 1.666$. В расчетах без энергоподвода получена следующая структура течения. При выбранных

параметрах у конуса реализуется режим с отошедшей ударной волной. Отход ударной волны был небольшой, но тем не менее он был ясно виден в численно полученной структуре течения. Этот вывод четко подтверждается экспериментальными данными [1]. В эксперименте [1] также наблюдалась отошедшая от вершины конуса ударная волна. Увеличение частоты следования импульсов f с 12 до 45 kHz привело к монотонному формированию сплошного следа за местом возникновения теплового пятна. Перед областью энергосвободения и вокруг нее формируется ударная волна. Так как рассматриваемый процесс имеет существенно нестационарный характер, то вокруг области энергосвободения в потоке периодически возникают новые ударные волны, которые взаимодействуют с ранее образовавшимися ударными волнами. При частотах $f = 12, 25$ kHz видны отдельные тепловые пятна, которые смещаются вниз по потоку от места возникновения. Это приводит к тому, что в потоке формируется пакет из областей с дозвуковыми и сверхзвуковыми скоростями потока. Этот пакет нестационарных волн последовательно взаимодействует с ударной волной перед конусом. Это приводит к изменению силы, действующей на конус. Однако при частоте $f = 45$ kHz уже виден почти сплошной след (рис. 1). Увеличение f с 45 до 100 kHz привело к малым изменениям в структуре потока:

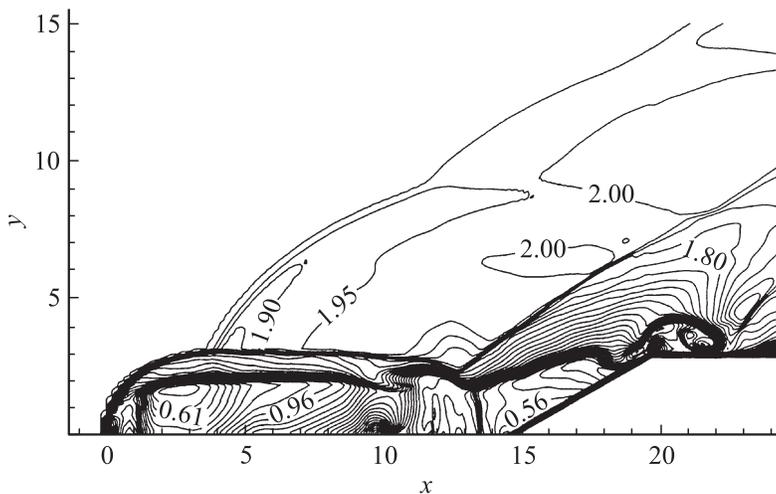


Рис. 1. Изолинии чисел Маха у конуса ($M_\infty = 2$, $f = 45$ kHz).

формируется след с почти слившимися тепловыми пятнами, в которых плотность резко понижена (почти в 5–10 раз, рис. 1); появляется огибающая ударная волна. Если для $f = 45$ kHz мы еще наблюдали пакеты чередующихся дозвуковых и сверхзвуковых областей, то при частотах $f = 60, 80, 100$ kHz всюду, за исключением отдельных точек, мы имеем дозвуковой след. С увеличением частоты на внешней границе следа наблюдается почти монотонное образование областей, близких к вихревым. Так, для частоты $f = 100$ kHz в потоке (на верхней границе следа) существовали области с отрицательной продольной скоростью. Это уже говорит о наличии в потоке вихревых образований.

Из расчетов для всего диапазона исследованных частот следует, что высота следа примерно постоянная и составляет величину 2–3 радиуса исходного энергоисточника. В структуре потока необходимо отметить еще одно явление. Вначале, когда еще нет энергоподвода, у конуса возникала отошедшая ударная волна. После формирования энергоисточника и дозвукового (либо трансзвукового) следа за ним часть ударной волны, находящаяся в следе, исчезает. Оставшаяся часть ударной волны видна в диапазоне частот $f = 12–45$ kHz. В этом диапазоне частот еще нет сформировавшейся огибающей ударных, сгенерированных импульсно-периодическим энергоподводом. Однако начало формирования огибающей видно уже при частоте $f = 45$ kHz (рис. 1). Расчет для частоты $f = 60$ kHz показывает, что огибающая ударных волн уже была полностью сформирована. Исходя из монотонного характера протекания процесса, можно предполагать, что формирование огибающей произошло при частоте примерно $f = 50$ kHz. Необходимо отметить, что огибающая ударных волн сформировалась далеко от тела, перед областью энергоподвода. Более ярко выраженное формирование огибающей ударных волн при $f > 50$ kHz привело к другому явлению: почти полному исчезновению ударной волны перед конусом, в области вне следа от энергоисточника.

Исследуя структуру течения во времени, можно отметить, что в следе для частоты $f > 50$ kHz формируется квазистационарный режим. Это является следствием того, что в этом диапазоне частот возникающие импульсы не разделены в пространстве друг от друга, а происходит наложение этих импульсов. Импульсы могут частично перекрывать друг друга или следовать друг за другом. Это зависит от частоты следования.

Было вычислено силовое воздействие на конус со стороны потока. На рис. 2, *a, b* представлены результаты зависимости силы, действующей

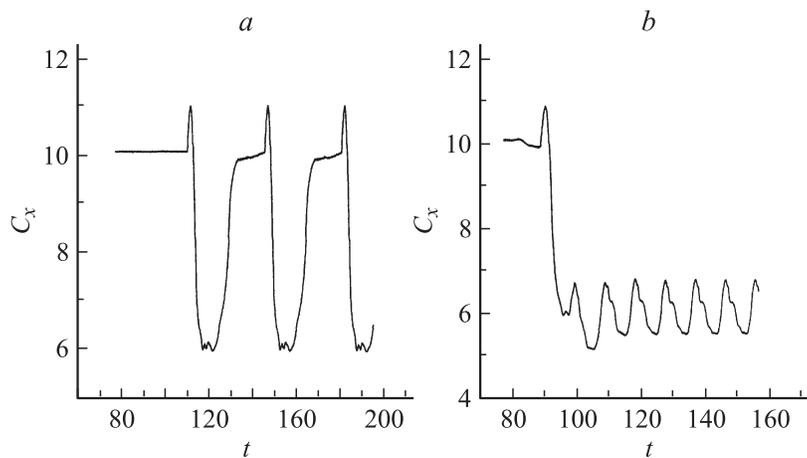


Рис. 2. Зависимость сопротивления конуса от времени: *a* — $f = 12$ kHz; *b* — $f = 45$ kHz.

на конус от времени при различных частотах, Вычислялась мгновенная сила, действующая на конус без учета донного сопротивления. Для всех частот на рис. 2, *a, b* можно выделить три области. Первая область — это область, на которой сила не зависит от частоты и времени. Это означает, что сила, действующая на конус, постоянна. Таким образом, в этом случае возмущения, созданные в результате импульсного подвода энергии, еще не достигли поверхности конуса. Вторая область — это область, когда возмущения достигли поверхности конуса, но это взаимодействие носит нестационарный, нерегулярный характер. И, наконец, третья область — это область, в которой зависимость силы от времени имеет периодический характер. Третью область можно охарактеризовать как область квазистационарного режима, а промежуток времени между первой и третьей областью — временем формирования квазистационарного режима. Из рис. 2, *a, b* следует, что это время очень слабо зависит от частоты импульсов.

Если мы вычислим частоту колебаний зависимости силы от времени на третьем (квазистационарном) участке, то увидим, что частота этих колебаний сильно зависит от частоты подвода энергии. Частота этих колебаний увеличивается, а далее выходит на асимптоту. Переход на асимптоту происходит примерно при частоте подвода энергии

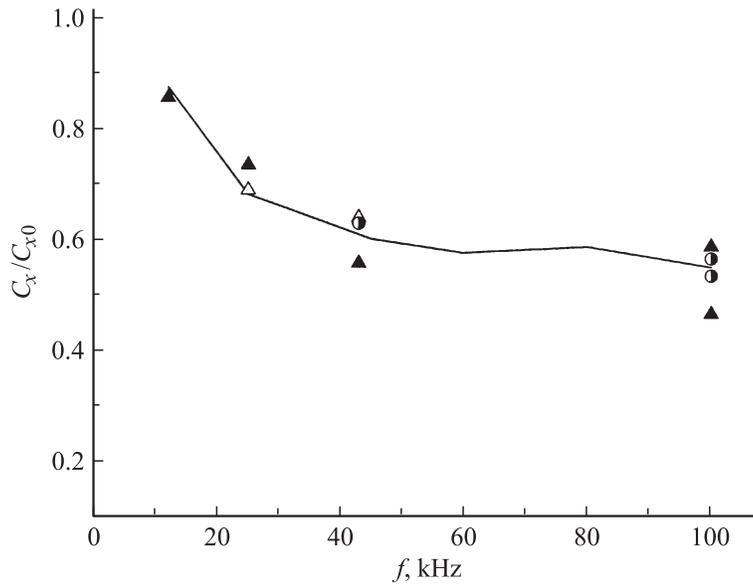


Рис. 3. Зависимость относительного сопротивления от частоты.

$f = 50\text{--}60$ kHz. Второе, что можно отметить из третьей области, — это существенное уменьшение амплитуды колебаний с увеличением частоты.

Для сравнения полученных численных результатов с экспериментальными данными была вычислена средняя сила, действующая на конус. В эксперименте [1] также измерялась средняя сила. Численное нахождение средней силы производилось на квазистационарном участке, и осреднение проводилось по 8–10 периодам. Результаты расчета показаны на рис. 3. На рис. 3 значками указаны экспериментальные результаты [1]. Сплошной линией показаны численные результаты.

По оси ординат указано отношение среднего сопротивления конуса с энергоподводом к сопротивлению конуса без энергоподвода. Из сравнения численных и экспериментальных данных видно их вполне удовлетворительное совпадение. Это говорит о том, что предлагаемая численная модель достаточно адекватно описывает исследуемое газодинамическое явление. Как численные, так и экспериментальные данные

указывают на возможное, за счет локального импульсно-периодического энергоподвода, снижение сопротивления конуса на 50%.

Выводы.

1. Разработана вычислительная технология для расчета течений с локализованным импульсно-периодическим энергоисточником, учитывающая экспериментальные данные.

2. Выполнены расчеты для условий эксперимента, которые качественно полно отражают все особенности структуры, а также дают хорошее количественное согласие по параметрам следа и сопротивлению конуса.

3. Созданная программа является важным инструментом для прогнозирования поведения структурных изменений течения при изменении начальных условий.

Список литературы

- [1] *Третьяков П.К.* и др. // Докл. РАН. 1996. Т. 351. № 3. 339–340.
- [2] *Георгиевский П.Ю., Левин В.А.* // Изв. РАН. Сер. МЖГ. 2003. № 5. С. 154–167.
- [3] *Гувернюк С.В., Самойлов А.Б.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 9. С. 1–8.
- [4] *Лукьянов Г.А.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 24. С. 76–82.
- [5] *Зудов В.Н.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 12. С. 81–87.
- [6] *Зудов В.Н., Третьяков П.К., Тушкин А.В., Яковлев В.И.* // Изв. РАН. Сер. МЖГ. 2003. № 5. С. 138–153.