

01;08

Развитие следа за импульсно-периодическим энергоисточником

© В.Н. Зудов

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

Поступило в Редакцию 25 января 2001 г.

Рассмотрена двумерная нестационарная задача о развитии следа за импульсно-периодическим энергоисточником, размещенным в сверхзвуковом потоке.

Введение. Задачи нестационарного распространения ударных волн и аэроакустических возмущений в сплошных средах, возникающие в различных областях научных исследований, чрезвычайно сложны для моделирования — как численного так и экспериментального. Примером могут служить процессы, происходящие при обтекании тел с воздействием на него импульсно-периодического подвода энергии от внешнего источника. Причем эффективность управления определяется нестационарной структурой течения [1]. Сложность эксперимента не позволяет проследить развитие следа за источником тепловыделения. Поэтому привлечение математического моделирования представляется необходимым для понимания и прогнозирования наблюдаемых эффектов. Другим возможным приложением может быть применение импульсно-периодического энергоклада в поток для стабилизации и повышения эффективности процессов горения топлив [1]. Источник энерговыведения инициирует последующее развитие фронта пламени. Рассмотренные задачи в определенной степени подобны, так как в обоих случаях в потоке формируется локализованный в заданном месте источник тепла. Необходимо заметить, что приведенные в [1] результаты влияния частоты следования энергоимпульсов на характеристики обтекания конуса и полусферы послужили отправным моментом в [2] для нахождения аэродинамических характеристик тел при решении задачи обтекания нестационарным по параметрам потока газом. Отличие предлагаемого исследования заключается в том, что, во-первых, основ-

ное внимание уделено формированию и развитию структуры следа за источником энерговыделения, во-вторых, были исследованы различные модели источника, в-третьих, было сделано развитие метода Годунова для такого класса задач.

В работе приводятся некоторые элементы разработанной автором методики и результаты проведенных расчетов обтекания сверхзвуковым потоком совершенного газа источника локального энерговыделения переменной мощности. Принятая модель описывается системой двумерных нестационарных уравнений газовой динамики, в которой задается как мощность энерговыделения, так и ее распределение в области локализации.

Были рассмотрены некоторые вопросы численного моделирования влияния пульсирующего источника тепловыделения на структуру сверхзвукового потока. В результате проведенных расчетов получены распределения газодинамических величин для рассматриваемого нестационарного процесса. Расчеты проводились по явной схеме сквозного счета без выделения ударных волн.

Постановка задачи. В сверхзвуковом потоке совершенного газа находится импульсно-периодический источник локального энерговыделения. Ось симметрии источника параллельна вектору скорости набегающего потока. Считается, что скорость набегающего потока постоянна и не зависит от времени. Мощность источника во времени меняется по заданному закону и зависит также от его положения в пространстве. Требуется рассчитать нестационарное изменение газодинамических характеристик потока, полагая, что мощность источника зависит от времени. В работе были рассмотрены также режимы с постоянной во времени мощностью энергоисточника. Задача решена в рамках двумерных нестационарных уравнений Эйлера с постоянным показателем адиабаты. Энергоподвод к потоку моделировался источником членом в уравнении энергии. Для решения рассматриваемой системы уравнений была использована схема типа метода Годунова. При определении численных потоков на гранях вычислительной ячейки был использован метод Harten, Lax, van Leer, Einfeldt (solver HLLEM) [5,6]. В описанном виде схема имеет второй порядок точности по пространственным переменным.

Граничные условия. Для реализации граничных условий были использованы слои фиктивных ячеек, окружающих вычислительную область. Слева на входной границе задавались постоянные параметры

равномерного сверхзвукового потока. Левая граница была удалена от источника так, чтобы нестационарные возмущения от импульсного энергоисточника не повлияли на параметры набегающего потока. Условия на входной границе в ходе расчета не изменялись. Условия, задаваемые на внешней (верхней) границе, должны допускать возможность ненулевых потоков через нее. Это достигается путем задания соответствующих входных и выходных инвариантов Римана, что позволяет учесть возмущения, распространяющиеся как внутрь рассматриваемой области (вдоль характеристик, соответствующих отрицательным собственным значениям), так и наружу (вдоль характеристик, соответствующих положительным собственным значениям). Выходная (правая) граница расчета устанавливалась на таком расстоянии от энергоисточника, чтобы можно было пренебречь продольными градиентами параметров течения. На этой границе также были использованы неотражающие краевые условия [4]. Поскольку ось энергоисточника является линией симметрии, то потоки через нее отсутствуют.

Результаты расчетов. Были рассмотрены три модели энергоисточников. В первой модели использовался вид источникового члена, как в [3]. Там был предложен сферический источник с гауссовским распределением интенсивности энергии переменной мощностью.

В расчетах принимались параметры набегающего потока: $\gamma = 1.4$, $M_\infty = 3.0$, центр источника радиуса 1 помещался в точку с координатами $y = 0$, $x = 1$.

Источник включается в начале каждого периода T на время τ и работает в импульсно-периодическом режиме. Мощность источника периодически меняется во времени. Для численных вычислений выбран сверхкритический режим подвода энергии. В этом случае в потоке возникают зоны дозвукового течения, которые пульсируют во времени. Необходимо отметить следующие особенности этого течения: во-первых, в области энергоподвода и за ней имеется поток с резко пониженным значением плотности (примерно в 5–10 раз), во-вторых, в области энергоподвода и за ней находилась локальная замкнутая зона дозвукового течения. Размеры этой зоны пульсировали во времени, но протяженность этой зоны была незначительной и она не развивалась во времени. Результаты расчетов подтвердили выводы работы [3].

Однако в экспериментах с импульсно-периодическим лазером [1] отмечалось, что источник энергии имеет протяженную форму. Вывод

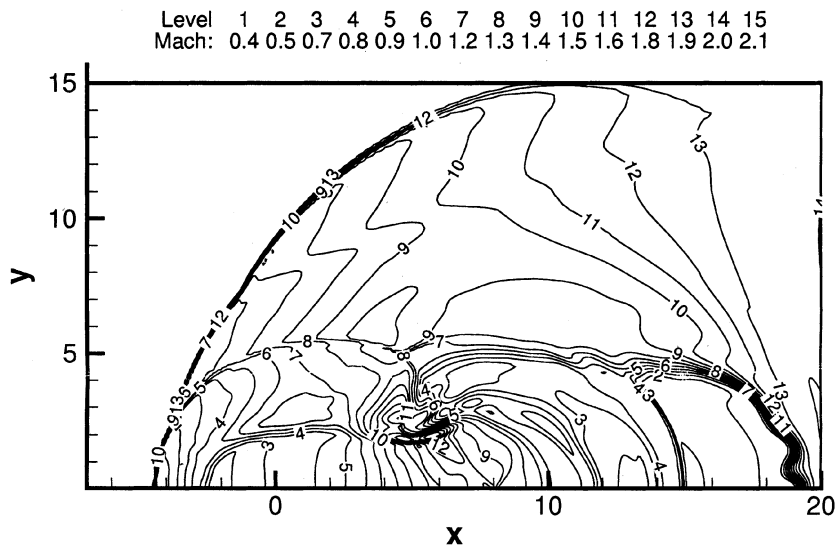


Рис. 1. Изолинии чисел Маха для эллиптического энергоисточника.

был сделан на основании анализа теневых фотографий. В качестве одного из приближений можно принять форму источника в виде вытянутого эллипса. Расчеты были выполнены для следующих исходных параметров: число Маха набегающего потока равнялось 2, а отношение полуосей было равно 5:1. Размер малой полуоси равнялся 1 mm. Был вычислен эффективный радиус, который в этом случае зависел от координаты x . Вне эффективного радиуса энергия не подводилась. Для численных вычислений выбран сверхкритический режим подвода энергии. Результаты расчетов представлены на рис. 1. Необходимо отметить следующие особенности этого течения: во-первых, в области энергоподвода и за ней имеется поток с резко пониженным значением плотности (примерно в 10–15 раз), во-вторых, в области энергоподвода и за ней была уже нелокальная зона дозвукового течения. Поперечные размеры этой зоны пульсировали во времени, но протяженность этой зоны была уже значительной и она выходила за границу рассматриваемой расчетной области.

В математической модели энергоисточника, предложенной в [3], поглощенная энергия зависит от плотности среды, которая в процессе энергоподвода резко уменьшается. В экспериментах [1] показано, что поглощенная средой энергия была приблизительно постоянной в каждом импульсе. Этот факт был учтен в предлагаемой модели. Кроме этого, форма области энерговыделения была выбрана в виде цилиндра, что наиболее согласуется с опытами. В соответствии с экспериментом [1] энергия, поглощенная средой, в одном импульсе равнялась $E_0 = 0.04J$, а частота следования импульсов равнялась 45 КHz. С учетом этого энергия, поглощенная средой, в 1 массы за 1 времени равна

$$e = \frac{E_0}{m\tau}, \quad (1)$$

где m — масса, к которой подводится энергия, а τ — время выделения энергии. Для условий эксперимента $\tau = 1 \mu s$, а период равен $22.2 \mu s$. Радиус цилиндра равнялся 1 mm, а длина цилиндра была равна 8.5 mm. На рис. 2 представлены результаты расчетов, показано распределение чисел Маха в развивающемся во времени следе за энергоисточником.

В процессе развития следа во времени необходимо отметить следующие особенности. На фоне общего потока за источником формируется спутная струя, являющаяся следом источника. Вначале формируется голова следа. Длина головы следа составляет примерно 15–20 mm. За головой следа формируется тело следа. Внешние очертания следа похожи на стрелу,двигающуюся по потоку от энергоисточника (рис. 2, *b*). Важной особенностью структуры следа является наличие вихревых зон в потоке. В вихревой зоне наблюдаются возвратные потоки, а также повышенный уровень температуры. Это является следствием того, что при выбранной частоте следования импульсов больших разрывов между двумя последовательными импульсами не было. Вихри образуются из-за разности в высоте между двумя следующими друг за другом импульсами. Разность в высоте образуется из-за того, что тепловое пятно от первого импульса расширилось и сместилось вниз по потоку, а следующий за ним импульс только образовался и занимает существенно меньшее пространство. Развивающаяся структура следа качественно соответствует наблюдаемой в эксперименте. Для количественного сравнения расчета и эксперимента необходимо иметь измеренные значения параметров потока в следе.

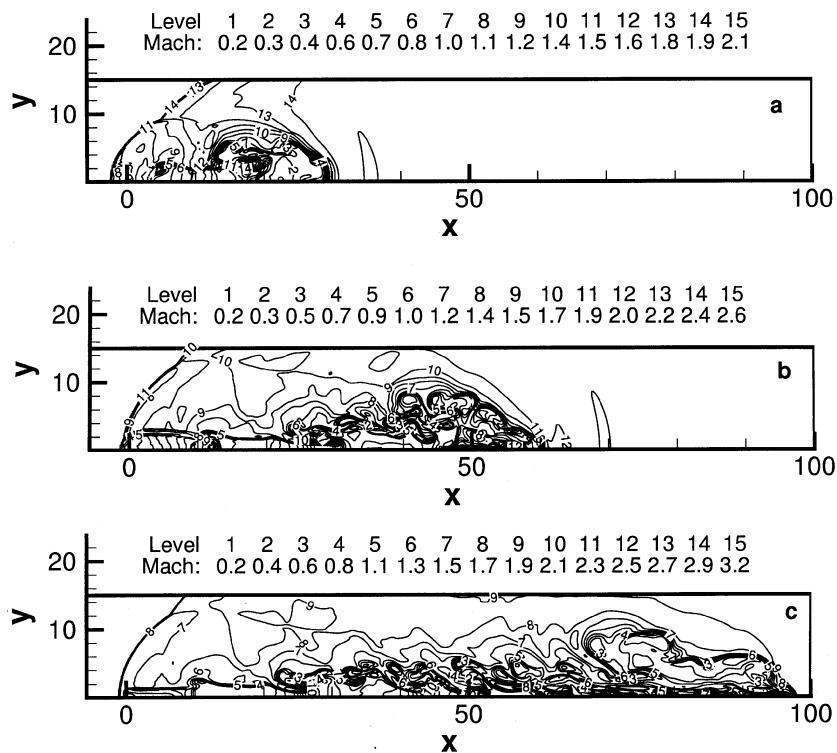


Рис. 2. Изолинии чисел Маха для цилиндрического энергоисточника в разные моменты времени: *a* — $t = 5.77$; *b* — $t = 14.95$; *c* — $t = 25.67$.

Так же как и для эллиптического, за цилиндрическим источником формируется зона дозвукового течения значительной протяженности. Поперечные размеры зоны, занимаемой вихревыми образованиями, увеличиваются с увеличением расстояния от источника, так, для $x = 100$ мм, что соответствует 11.8 длинам источника, радиус следа в 15 раз превышает радиус источника.

Наличие вихревых зон может служить очень хорошей основой для образования областей воспламенения. Вихревые зоны будут способствовать улучшению процессов перемешивания топлива и окислителя, а повышенная температура в них улучшит процесс воспламенения.

Выводы.

1. Модель источника оказывает существенное влияние на результаты расчетов. Полученные отрывные зоны (вихревые зоны с возвратными потоками) могут служить хорошей основой для улучшения процессов горения;

2. На фоне общего потока за источником формируется спутная струя, являющаяся следом источника. Возможно, что энергетика источника влияет на интенсивность возникающей спутной струи.

3. Частота следования импульсов должна быть такой, чтобы процессы образования вихревых зон не затухали.

В заключение автор выражает благодарность П.К. Третьякову за полезное обсуждение результатов работы.

Список литературы

- [1] Третьяков П.К., Яковлев В.И. // ДАН. 1999. Т. 365. № 1. С. 58–60.
- [2] Гувернюк С.В., Самойлов А.Б. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 9. С. 1–8.
- [3] Georgievsky P.Yu., Levin V.A. // In proceedings of ICMAR. Part II. P. 58–64. Novosibirsk, Russia, 1998.
- [4] Thompson K.W. // J. Comput. Phys. 1987. V. 68. N 1. P. 1–24.
- [5] Harten A., Enquist B., Osher S., Chakravarty S.R. // J. Comput. Phys. 1987. V. 71. P. 231.
- [6] Einfeldt B. // SIAM Jour. Numer. Anal. 1988. V. 25. N 2. P. 294–318.