

03

Взаимодействие ударной волны с дозвуковым нагретым слоем

© В.Н. Зудов

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

Поступило в Редакцию 26 апреля 2010 г.

Численно рассмотрена задача о снижении интенсивности падающей ударной волны при прохождении ее через нагретый слой конечной толщины. Обнаружено три режима взаимодействия падающей ударной волны с нагретым слоем. Показано, что существенное уменьшение интенсивности падающей ударной волны происходит при взаимодействии ее с нагретым дозвуковым струйным следом.

Имеющиеся экспериментальные и расчетные данные указывают на то, что взаимодействие возмущений с газодинамическими неоднородностями потока может привести к неожиданным свойствам течения [1–3]. Эти новые свойства могут иметь как положительные последствия, так и отрицательные, иногда катастрофические (например, в воздухозаборнике). Поэтому требуется достаточно надежный уровень моделирования получаемых новых явлений. Сложность эксперимента не позволяет проследить за нестационарным развитием струйного следа. Поэтому привлечение математического моделирования представляется необходимым для понимания и прогнозирования наблюдаемых эффектов. Рассмотрим струйный след в сверхзвуковом потоке, который является узкой, но достаточно протяженной областью, с резко отличающимися от набегающего потока газодинамическими параметрами (например, температурой, плотностью).

В различных газодинамических приложениях возникает задача о взаимодействии струйного следа с внешним, в общем случае, нестационарным возмущением. Внешнее возмущение может быть слабым и сильным. В качестве слабого возмущения обычно рассматриваются волны сжатия и разрежения. Сильным возмущением в сверхзвуковом потоке является ударная волна. При этом возможны два варианта взаимодействия внешнего возмущения со следом. Первый — в сверхзвуковом потоке существует стационарная ударная волна и перед ней

начинается формирование достаточно протяженного струйного следа, который начинает взаимодействовать с ударной волной [3–5]. Вторым вариантом — в сверхзвуковом потоке находится протяженный струйный след. В некоторый момент времени в потоке возникает сгенерированная каким-либо образом нестационарная ударная волна, которая начинает взаимодействовать с протяженным струйным следом.

В предлагаемой работе рассматривается нестационарное взаимодействие ударной волны с нагретым слоем (струйным следом). Было изучено влияние пониженной по сравнению с основным потоком плотности и числа Маха в струйном следе на режимы взаимодействия следа с падающей на него ударной волной.

В сверхзвуковом потоке совершенного газа находится ограниченная по высоте струя газа. Параметры этой струи могут быть как сверхзвуковыми, так и дозвуковыми. Ось симметрии струи параллельна вектору скорости набегающего потока. Пусть в сверхзвуковом потоке внезапно помещается клиновидное тело, которое является генератором ударной волны. Вблизи поверхности клина возникает нестационарный процесс формирования ударной волны, которая затем начинает взаимодействовать со струйным следом. Требуется определить изменение газодинамических характеристик потока как в области над струей и в самой струе, так и в области под струей. Задача решена в рамках двумерных нестационарных уравнений Эйлера с постоянным показателем адиабаты. Для решения рассматриваемой системы уравнений был использован метод Годунова совместно с TVD-схемой [3–5]. В описанном виде схема имеет второй порядок точности по пространственным переменным. Для реализации граничных условий были использованы слои фиктивных ячеек, окружающих вычислительную область. Слева на входной границе задавались постоянные параметры равномерного сверхзвукового и дозвукового потока. Левая граница была удалена от места нестационарного взаимодействия ударной волны с контактным разрывом так, чтобы нестационарные возмущения от взаимодействия не повлияли на параметры набегающего потока. Условия на входной границе в ходе расчета не изменялись. На верхней границе было задано условие непротекания. Выходная (правая) граница расчета устанавливалась на таком расстоянии, чтобы можно было пренебречь продольными градиентами параметров течения.

В сверхзвуковом потоке с числом Маха $M = 2$ находится струйный след. Высота струйного следа равна 1 см. Все расчеты проводились

при скорости потока воздуха, соответствующей числу Маха $M = 2.0$, полному давлению $P_0 = 0.25$ МПа и температуре торможения $T_0 = 288$ К. Скачок уплотнения генерировался с помощью клина с углом 20° . Скорость основного потока всегда была сверхзвуковой, а скорость струи менялась от дозвуковой до сверхзвуковой. В основном потоке были заданы число Маха, полное давление и полная температура, а в струе — число Маха, давление, равное давлению основного потока. Дополнительно было задано отношение плотностей в основном потоке и в струе. В работе использована многоблочная вычислительная сетка. Она была адаптирована к структуре течения, которая была предварительно получена на крупной сетке. Расчеты обычно проводились на сетке с числом узлов 500×400 соответственно по x и y направлениям. Из постановки задачи следует, что вначале формируется струйный след, а затем на него падает ударная волна. Генератором ударной волны служила верхняя граница расчетной области, которая содержала угол сжатия. Рассматриваемый процесс имеет существенно нестационарный характер. Формирующаяся перед клином ударная волна падает на контактную поверхность раздела двух потоков (основного и струйного, а также струйного и основного). Происходит нестационарное взаимодействие наклонной ударной волны с контактной поверхностью. Эта постановка имеет некоторые аналогии в акустике и электродинамике. В акустике рассматривается задача о взаимодействии звукового возмущения с границей раздела двух сред. Контактные границы можно рассматривать как препятствие на пути распространения акустических волн. Как и всякое препятствие, контактная граница вызывает в рассматриваемой области появление прошедшей и отраженной волн, отраженная волна бежит навстречу падающему возмущению. Для плоских волн, падающих нормально на плоское препятствие с резкой границей, оказывается, что коэффициенты отражения и прохождения зависят от акустического импеданса двух сред. Акустический импеданс определяется произведением плотности среды на скорость звука в ней. В зависимости от акустического импеданса сред и формируется интенсивность проходящей волны. Однако рассматриваемая постановка предполагает: во-первых, нелинейное, нестационарное взаимодействие ударной волны с нагретым слоем; во-вторых, нагретая струя имеет конечную высоту.

В расчетах был исследован диапазон чисел Маха истечения струи $M_j = 0.7, 1.05, 2.0$. Для этих значений M_j плотность в струе была в 2 раза ниже плотности основного потока. Рассмотрим изменение

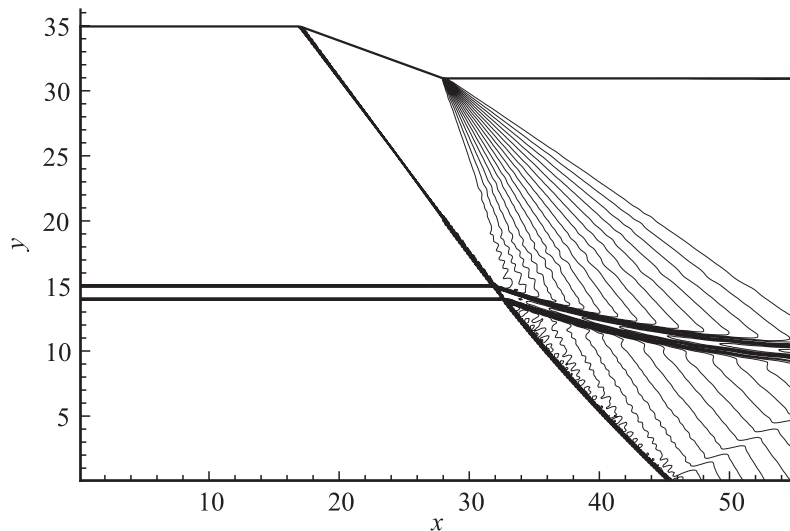


Рис. 1. Изолинии плотности ($M = M_j = 2$).

структуры течения при изменении числа Маха в струе. Вначале рассмотрим предельный режим течения с $M_j = M = 2$ (рис. 1). Поскольку давление в основном потоке и струе одинаково, плотности отличаются в 2 раза, то из уравнения состояния следует, что и температуры также будут отличаться в 2 раза, т.е. температура в струе будет в 2 раза выше, чем температура основного потока. Можно отметить следующие особенности структуры течения. След за точкой взаимодействия падающей ударной волны со струей остается сверхзвуковым. При падении ударной волны на след в структуре его происходят следующие изменения. Падающая ударная волна проходит сквозь след и распространяется под некоторым углом в области вне следа. Интенсивность проходящей ударной волны значительна. Так, перепад давления (отношение давления за ударной волной к давлению перед ней) на падающей ударной волне был равен 2.8, а на проходящей ударной волне он равен 2.41, т.е. ослабление ударной волны было малым. Внутри следа, в области взаимодействия, не происходит перехода через скорость звука. Из полученной выше структуры течения следует, что струйный след слабо меняет свою высоту (рис. 1).

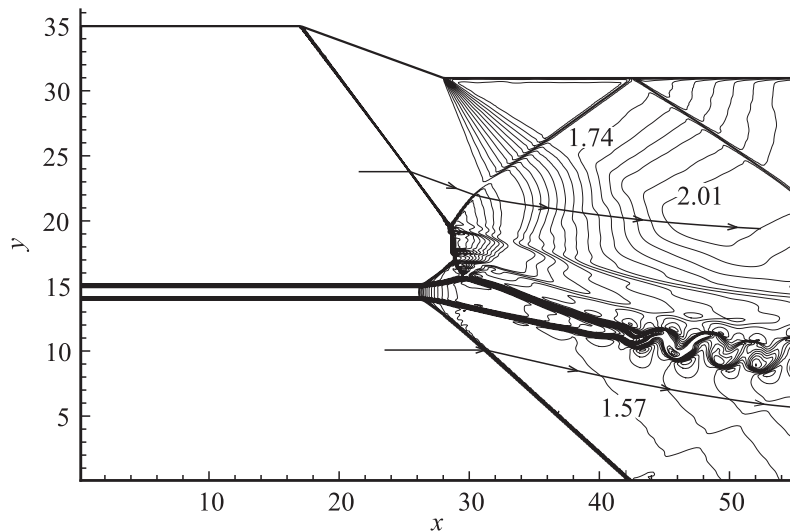


Рис. 2. Изолинии чисел Маха ($M = 2$, $M_j = 1.05$).

Рассмотрим второй режим течения с $M_j = 1.05$ (рис. 2). В отличие от предыдущего режима в следе возникает новое явление. В следе происходит переход через скорость звука и формирование ударных волн в этом месте на нижней и верхней границах следа. Переход через скорость звука происходит внутри струи на прямом скачке уплотнения, который продолжается вне струи в форме наклонных ударных волн. Прямой скачок уплотнения находится слева от точки пересечения падающей ударной волной границы струи, т.е. вначале наблюдается нестационарное перемещение прямого скачка уплотнения вверх по потоку, а затем установление его в некотором стационарном состоянии. Проходящая ударная волна имеет меньший угол наклона, чем падающая ударная волна. Интенсивность проходящей ударной волны была также значительна. Так, перепад давления был равен 2.8, а на проходящей ударной волне он равен 1.97, т.е. ослабление ударной волны также было мало. В струе, за прямым скачком уплотнения, образуется протяженная дозвуковая область. Поперечное сечение этой области существенно превышает исходную высоту струи. В дальнейшем дозвуковой струйный след становится сверхзвуковым. Точка, в которую приходит падающая

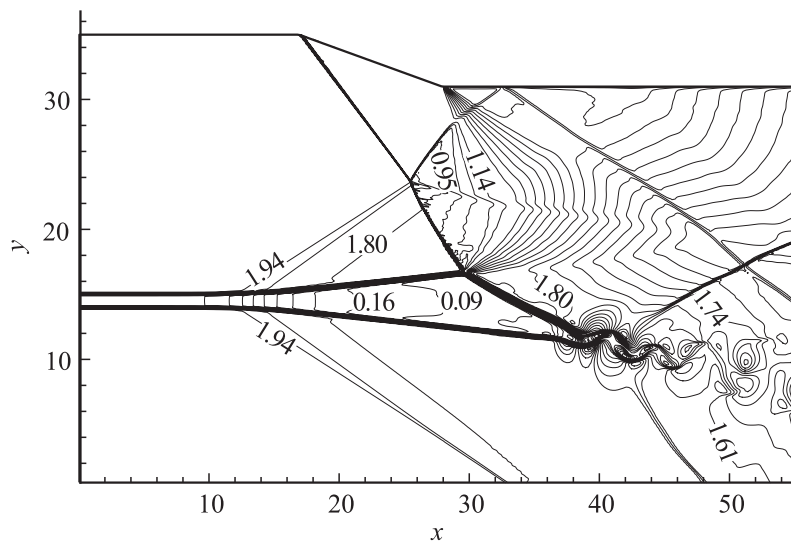


Рис. 3. Изолинии чисел Маха ($M = 2$, $M_j = 0.7$).

ударная волна, является точкой излома границы струи, т.е. на границе реализуется угол расширения, в котором существует проходящая ударная волна и веер разрежения. Необходимо также отметить наличие отраженной ударной волны в области выше границы струйного следа (рис. 2).

Рассмотрим третий режим течения с числом Маха в струе $M_j = 0.7$ (рис. 3). Во-первых, необходимо отметить, что уменьшение числа Маха M_j приводило к существенному увеличению области влияния ударной волны на дозвуковую струю, т.е. возмущение все дальше уходило вверх по потоку от точки взаимодействия падающей ударной волны с границей струи. Для этого режима характерно плавное расширение границы струи, что отличает его от режима с $M_j = 1.05$. В этом случае вместо конического скачка наблюдалась область сжатия, в которой угол наклона изолиний числа Маха (или плотности) имеет малый наклон к оси струи. Максимальное увеличение поперечной площади струи наблюдается в месте прихода падающей ударной волны на границу струи (рис. 3).

На некотором расстоянии вниз по течению от области взаимодействия струя становится сверхзвуковой. В отличие от рассмотренных выше режимов, на внешних границах (верхней и нижней) образуются волны сжатия. Ранее наблюдалась проходящая ударная волна. В точке взаимодействия падающей ударной волны с границей дозвуковой струи образуется веер разрежения. Рассмотрим результаты по перепаду давления на проходящих тепловой слой возмущениях. В этом режиме перепад давления равен 1.4. Из полученных значений следует, что с уменьшением числа Маха нагретого слоя уменьшается и перепад давления в прошедшей ударной волне. И для нагретого дозвукового, струйного следа он достигает минимального значения. Таким образом, может быть получено значительное уменьшение интенсивности падающей ударной волны при взаимодействии ее с нагретым дозвуковым, струйным следом.

Таким образом, рассмотрена задача по снижению интенсивности падающей ударной волны при прохождении ее через нагретый слой конечной толщины. С использованием численного моделирования выявлено три режима взаимодействия падающей ударной волны с нагретым слоем конечной толщины. Показано, что существенное уменьшение интенсивности падающей ударной волны происходит при взаимодействии ее с нагретым дозвуковым, струйным следом.

Список литературы

- [1] Охитин В.Н., Меньшаков С.С. // ПМТФ. 2002. Т. 43. № 4. С. 87–97.
- [2] Артемьев В.И., Бергельсон В.И., Немчинов И.В., Орлова Т.И., Рыбаков В.А., Смирнов В.А., Хагинс В.М. // Математическое моделирование. 1989. Т. 1. № 8. С. 1–11.
- [3] Зудов В.Н., Пимонов Е.А. // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 4. С. 10–21.
- [4] Зудов В.Н. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 7. С. 46–52.
- [5] Зудов В.Н., Третьяков П.К., Тупикин А.В., Яковлев В.И. // Изв. РАН. Сер. МЖГ. 2003. № 5. С. 138–153.