

УДК 533.6.011

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
С КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

© 2011 г.

В.Н. Зудов

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

zudov@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Численно исследована задача о нестационарном взаимодействии ударной волны с нагретым слоем конечной толщины. Обнаружено три типа взаимодействия ударной волны с нагретым слоем. Показано, что существенное уменьшение интенсивности падающей ударной волны возможно при взаимодействии ее с дозвуковым нагретым слоем.

Ключевые слова: ударная волна, нагретый слой, численное моделирование.

Имеющиеся экспериментальные и расчетные данные указывают на то, что взаимодействие возмущений с газодинамическими неоднородностями потока может привести к неожиданным свойствам течения. Эти новые свойства могут иметь как положительные последствия, так и отрицательные.

Исследуются нестационарные режимы взаимодействия ударной волны с контактной поверхностью. В качестве примеров контактных поверхностей были рассмотрены нагретый дозвуковой слой в сверхзвуковом потоке и след от импульсно-периодического энергоисточника в сверхзвуковом потоке. Сначала исследуется нестационарное взаимодействие ударной волны с нагретым слоем (струйным следом).

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 сверхзвуковом потоке совершенного газа находится ограниченная по высоте струя газа. Параметры этой струи могут быть как сверхзвуковыми, так и дозвуковыми. 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. Скорость основного потока всегда была сверхзвуковой, а скорость струи менялась от дозвуковой до сверхзвуковой. В основном потоке было задано число Маха, полное давление и полная температура. В струе было задано число Маха, давление, равное давлению основного потока. Дополнительно было задано отношение плотностей в

основном потоке и в струе. В работе использовалась многоблочная вычислительная сетка, адаптированная к структуре течения, которая была предварительно получена на крупной сетке.

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 два раза ниже плотности основного потока. Рассмотрим изменение структуры течения при изменении числа Маха в струе. Вначале рассмотрим предельный режим течения с $M_j = M = 2$. 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 равен 2.8, а на проходящей ударной волне он равен 2.41. Рассмотрим второй режим течения с $M_j = 1.05$. В отличие от предыдущего режима, в следе возникает новое явление: переход через скорость звука и формирование ударных волн в этом месте на нижней и верхней границах следа. 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.

Рассмотрим третий режим течения с числом Маха в струе $M_j = 0.7$. Необходимо отметить, что уменьшение числа Маха M_j приводило к существенному увеличению области влияния ударной волны на дозвуковую струю. Для этого режима характерно плавное расширение границы струи, что отличает его от режима с $M_j = 1.05$. В этом

режиме перепад давления на проходящих тепловой слой возмущениях равен 1.4. Таким образом, для нагретого дозвукового струйного следа может быть получено значительное уменьшение интенсивности падающей ударной волны при взаимодействии ее с нагретым дозвуковым струйным следом.

В настоящем исследовании представлены результаты численного моделирования нестационарной газодинамической структуры, возникающей при обтекании сверхзвуковым потоком пульсирующего теплового источника у поверхности. В сверхзвуковом стационарном потоке с числом Маха $M = 2$ над поверхностью находится импульсно-периодический энергоисточник с отношением продольного размера к поперечному, равным 4:1. Время выделения энергии 10^{-6} с. Частота повторения импульсов равна 100 кГц. Выявлено влияние газодинамических и энергетических параметров на структуру течения исследуемого явления. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в зависимости от выделенной энергии возможны три режима взаимодействия.

В расчетах получена сформировавшаяся перед импульсно-периодическим энергоисточником нестационарная ударная волна, которая падает на поверхность и отражается также ударной волной. В зависимости от интенсивности энергоисточника за ним может сформироваться сверхзвуковой, трансзвуковой или дозвуковой квазистационарный след. Этот след условно можно разделить на две области. В первой области, примерно соответствующей 2–3 длинам области энерговыделения, след имеет нестационарный характер, во второй – течение квазистационарное. Во второй области след может быть в среднем по сечению трансзвуковым, или дозвуковым. В зависимости от типа следа могут образоваться различные режимы взаимодействия падающей ударной волны со следом за энергоисточником. Расчеты показывают, что скорость в следе от энергоисточника очень высока и превышает скорость вне следа в 10–15 раз для диапазона энергий $E = 8–15$ Дж. Для этих значений энергии плотность в следе была в десятки раз ниже, чем в области вне следа.

В зависимости от импульсно-периодически подведенной энергии возможны различные ситуации внутри области подвода энергии. Это зависит от частоты и количества подведенной энергии. Течение внутри области подвода энергии может быть чисто дозвуковым или смешанным. При больших частотах энергоподвода ($f \geq 50$ кГц) в потоке образуются движущиеся газодинамические области (пакеты), которые либо следуют друг за другом, либо перемещаются с частичным на-

ложением друг на друга. Скорость в пакетах может быть как дозвуковой, так и сверхзвуковой. Длина этих пакетов соизмерима с длиной области энергоподвода. Движущиеся вниз по потоку пакеты тормозятся внешним течением, продольная скорость которого, как было уже отмечено, значительно ниже продольной скорости внутри следа. При малых значениях подведенной энергии это может приводить к глобальному переходу течения в следе через скорость звука в некотором сечении вниз по потоку, т.е. далее за звуковой линией течение в следе будет полностью дозвуковое. Тем не менее, эта дозвуковая скорость существенно выше (приблизительно в 5 раз) продольной скорости вне следа.

В месте перехода через скорость звука происходит расширение поперечного сечения следа. Поэтому на внешней стороне следа в этом месте образуется ударная волна. Эта ударная волна имеет нестационарный характер, что выражается в ее колебаниях относительно некоторого среднего положения. Вариация подведенной энергии в диапазоне $E = 1; 8; 15$ Дж приводит к существенному изменению структуры течения в следе. Для энергии $E = 1$ Дж след за энергоисточником становится почти полностью сверхзвуковым. Это происходит до момента взаимодействия ударной волны со следом. Скорость в следе больше скорости вне следа примерно в 1.5 раза. Падающая ударная волна проходит сквозь след и распространяется под некоторым углом в верхней области вне следа. Отраженное от контактной поверхности возмущение было очень слабым. Для $E = 8$ Дж можно отметить следующие особенности: на начальном участке след становится трансзвуковым, а затем в следе происходит переход через скорость звука и формирование ударных волн на его нижней и верхней границах следа. Ударные волны имеют нестационарный характер. Это выражается в их колебаниях относительно некоторого среднего положения. Амплитуда колебаний ударной волны была достаточно значительной. Так, для условий энергии $E = 12$ Дж амплитуда пространственных колебаний была приблизительно равна $\Delta x = 8$ (длина области энергоподвода равна 4). Если сопоставить это с размерами энергоисточника, то в зависимости от подведенной энергии, амплитуда пространственных колебаний была либо сопоставима с длиной энергоисточника, либо превышала ее примерно в два раза.

Оценки частоты колебаний ударной волны показывают, что она была порядка нескольких герц. Квазистационарная головная ударная волна, сформированная перед энергоисточником, падает на поверхность и отражается от нее квазистационар-

ной ударной волной. Отраженная ударная волна падает теперь на дозвуковую часть следа и отражается от него веером разрежения. При $E = 15$ Дж течение в следе полностью дозвуковое, что приводит к исчезновению ударных волн на его внешней стороне. Отраженная от стенки ударная волна падает на дозвуковой след и отражается от него веером разрежения.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что в зависимости от выделенной энергии возможны три режима взаимодействия. В первом режиме взаимодействия удар-

ная волна пересекает след от энергоисточника. Во втором режиме отраженная от стенки ударная волна не пересекает след, но в следе формируется довольно мощная система новых ударных волн. Третий тип взаимодействия характерен тем, что падающая на след ударная волна отражается от него веером разрежения и новых ударных волн не возникало. Тип взаимодействия зависит от энергии локализованного энергоисточника. В трансзвуковом следе реализовались первые два типа взаимодействия. Для дозвукового следа реализовался третий тип взаимодействия.

INTERACTION OF A SHOCK WAVE WITH A CONTACT DISCONTINUITY

V.N. Zudov

The problem of attenuation of an incident shock wave on the passage through a heated layer of finite thickness has been considered by numerical methods. Three possible regimes of interaction of the incident shock wave with the heated layer are revealed. It is shown that a significant decrease in intensity of the incident shock wave is caused by its interaction with a heated subsonic jet trace.

Keywords: shock wave, 3D pseudorandom loading, natural frequencies, finite element analysis, modal analysis.