

03

К вопросу об отражении ударных волн и ударно-волновых конфигураций

© И.В. Красовская, М.К. Березкина

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: i.kras@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 16 июля 2007 г.

Предлагается новый подход к проблеме нестационарного отражения ударных волн. Показывается, что тип и параметры конфигурации отражения зависят от того, какой объект — одиночная ударная волна или ударно-волновая конфигурация — подходит к отражающей поверхности. Вводится понятие отражения ударно-волновой конфигурации. Приводятся данные, иллюстрирующие тот факт, что найденные теоретически границы существования различных типов конфигураций не есть линии перехода, если с поверхностью взаимодействует не одиночная ударная волна, а ударно-волновая конфигурация.

PACS: 47.40.Nm, 46.40.Cd

Почти 130 лет не теряет актуальности проблема отражения ударных волн. Несмотря на обширный материал экспериментальных и численных исследований [1], некоторые наблюдаемые закономерности процесса взаимодействия ударных волн до сих пор не имеют удовлетворительных объяснений. В частности, это вопрос реализации конкретного типа отражения в области, где теоретически допустимо существование и правильного (RR), и маховского (MR) отражения. Другой проблемой является поиск критерия перехода $RR \leftrightarrow MR$, поскольку экспериментальные данные во многих случаях не совпадают с предложенными теоретическими критериями.

Теоретическим фундаментом для исследования феномена отражения ударных волн являются локальные теории двух- и трехударной конфигураций. К исследованию пересечений ударных волн в стационарных потоках успешно применяется трехударная теория Неймана, которая, фактически, есть элементарная аналитическая модель для описания поля течения в окрестности точки пересечения разрывов. Что касается псевдостационарных условий отражения, то этот случай более корректно описывается теорией Кабанна [2], предложившего

модель отражения движущейся ударной волны от неподвижного клина. Основным допущением теории является перпендикулярность прямолинейного по всей длине стебля Маха к поверхности клина. Если теория Неймана описывает трехударную конфигурацию вне зависимости от истории возникновения, то теория Кабанна дает представление об автоматическом развитии конфигурации из некоторой точки, отвечающей началу процесса. Сравнительный анализ обеих теорий можно найти в [3]. Следует подчеркнуть, что трехударная теория Неймана не дает возможности определить размеры стебля Маха, в то время как теория Кабанна такую возможность предоставляет.

Для анализа нестационарного отражения ударных волн базой следует выбрать теорию Кабанна. Определяющими параметрами для расчета конфигураций, образующихся при псевдостационарном отражении ударной волны от клина, являются число Маха M или отношение плотностей ξ на фронте падающей ударной волны и угол клина β . Границы и области существования различных решений в плоскости (M, β) показаны на рис. 1 для газа с $\gamma = 1.4$. Двухударная теория дает решения в области, ограниченной снизу линией E . Ниже линии E , которая называется границей правильного отражения, лежит область неправильного (не обязательно маховского) отражения. Область, в которой трехударная теория Кабанна имеет решения, лежит под линией D . Заметим, что в области, находящейся между границами D и E , теория допускает существование и двухударной, и трехударной конфигурации. Выявить газодинамический смысл решений, получаемых в трехударной теории, позволяет использование концепции Ландау о направленности ударной волны. С ее помощью можно различать ударные волны, приходящие извне в точку пересечения разрывов и рожденные в ней (исходящие). Анализ решений трехударной теории показывает, что помимо решений, относящихся к отражению, существует класс решений, не имеющих прямого отношения к отражению. Трехскачковая конфигурация есть результат отражения, если она содержит одну приходящую (падающая ударная волна) и две исходящих волны (отраженная волна и ствол Маха). Конфигурация данного типа существует в области, лежащей под кривой B — линией, на которой меняет направленность ствол Маха. Граница B называется границей стационарных маховских конфигураций. При параметрах, соответствующих кривой B , траектория тройной точки оказывается параллельной поверхности клина, т.е. носик клина, как начальная точка отражения, „теряется“. Исчезает и возможность определения высоты стебля Маха. Выше кривой B лежит область, в

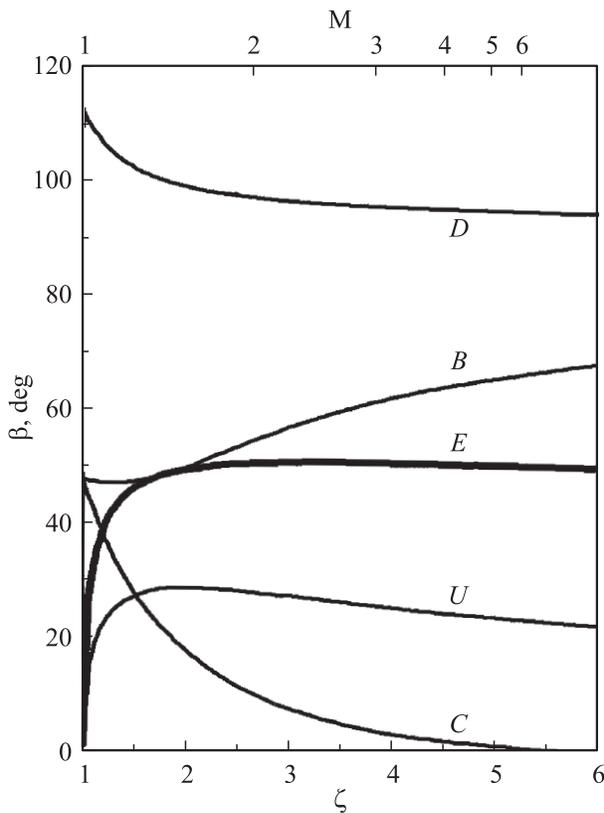


Рис. 1. Границы и области существования различных решений двух- и трехударной теорий.

которой тройная конфигурация состоит из двух приходящих (падающая волна и ствол Маха) и одной исходящей волны. Траектория тройной точки направлена к поверхности клина. Данная конфигурация интерпретируется двояко: как обращенная конфигурация отражения [1] и как конфигурация нерегулярного встречного столкновения двух волн [3]. Авторы данной работы поддерживают вторую интерпретацию.

Изменение направленности у отраженной волны трехударной конфигурации происходит на границе C . Ниже C лежит область, где

треударная конфигурация состоит из двух следующих друг за другом приходящих волн и одной исходящей (ствол Маха), т.е. относится к типу слияния. Линия C есть граница слияния. В области неправильного отражения находится еще одна граница, которую дает двухударная теория. Это линия U , которая соответствует звуковому потоку за падающей ударной волной. В области под границей U поток за падающей волной — дозвуковой в системе координат, связанной с точкой пересечения ударной волны с поверхностью клина, поэтому в данной области неправильное отражение не может породить конфигурацию с отраженной ударной волной.

Итак, в плоскости (M, β) существует несколько областей неоднозначных решений. Среди них область, лежащая между линиями D и B , где может существовать система правильного отражения и трехударная конфигурация нерегулярного встречного столкновения двух волн. Между границами B и E одинаково возможно существование как правильного, так и маховского отражения. Граница C разделяет область под линией U на две подобласти: ниже C теория допускает неправильное отражение без отраженной ударной волны и слияние двух ударных волн в одну, выше — неправильное отражение без отраженной ударной волны и маховское отражение.

Для того чтобы выявить факторы, влияющие на реализацию того или иного решения в двузвучной области, рассмотрим результаты численных расчетов взаимодействия ударной волны с одиночным и двугранным клиньями. Расчеты проведены для числа Маха падающей волны $M = 2.0$ в совершенном газе с $\gamma = 1.4$ с использованием кода [4]. На рис. 2, a, b даны поля течений в виде изолиний температуры для одиночного клина с углом $\beta = 6^\circ$ и для двугранного клина ($\beta_1 = 52^\circ$, $\beta_2 = 6^\circ$) соответственно. Определяющие параметры отражения падающей ударной волны от клина с углом наклона 6° одинаковы для обоих вариантов, но в первом случае имеет место неправильное отражение без отраженной ударной волны, т.е. формируется конфигурация Неймана (рис. 2, a), а во втором случае образуется трехударная конфигурация (рис. 2, b). Тип конфигурации определяется как слияние, а не как отражение. Заметим, что к вершине второго клина подходит не одиночная волна, но образовавшаяся на первом клине двухударная конфигурация правильного отражения, создавая совершенно другие начальные условия для процесса отражения от второго клина. Со вторым клином взаимодействуют одновременно обе волны (падающая

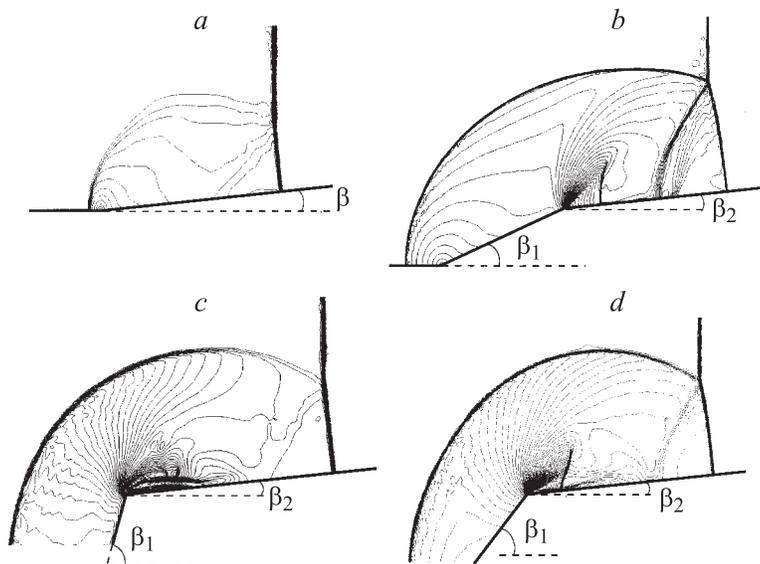


Рис. 2. Поля изолиний температуры.

и отраженная). Для данных параметров отраженная волна играет доминирующую роль в процессе взаимодействия со вторым клином. Она дифрагирует около второй грани, „оттесняя“ падающую волну. Догонное взаимодействие дифрагированной волны с невозмущенной падающей волной приводит к образованию трехударной конфигурации слияния. На рис. 2, *c, d* показаны картины течений взаимодействия той же ударной волны с двойными клиньями ($\beta_1 = 75^\circ$, $\beta_2 = 6^\circ$) и ($\beta_1 = 25^\circ$, $\beta_2 = 6^\circ$) соответственно. Заметим, что параметры взаимодействия со вторым клином для падающей волны остаются такими же, как в предыдущих вариантах, но предыстория взаимодействия другая. Для случая, представленного на рис. 2, *c*, к носу второго клина подходит двухударная конфигурация регулярного отражения, но ее параметры отличаются от параметров двухударной конфигурации, соответствующей варианту, данному на рис. 2, *b*. В результате формируется конфигурация неправильного отражения без отраженной волны. Для варианта, данного на рис. 2, *d*, к носу второго клина подходит трехударная маховая си-

стема волн. В результате последовательных взаимодействий на втором клине образуется трехударная конфигурация, тип которой определяется как отражение. Приведенные примеры показывают, что формирование конкретной конфигурации на отражающей поверхности зависит от условий, с которых начинается взаимодействие. Отражаться может как одиночная ударная волна, так и ударно-волновая конфигурация, параметры которой будут влиять на вид результирующей конфигурации. При взаимодействии прямолинейной ударной волны с цилиндрической (выпуклой или вогнутой) поверхностью отражение происходит при последовательно меняющихся углах падения на поверхность, вследствие чего наблюдается смена типов конфигураций отражения. Считается, что на плоскости (M, β) , такой процесс соответствует перемещению вдоль прямой $M = \text{const}$ от точки, отвечающей началу отражения (рис. 1). Смена форм отражения должна иметь место на рассмотренных выше границах существования различных типов конфигураций, т.е. границы трактуются как линии перехода. Однако после того как в начальный момент отражения из одиночной волны возникла соответствующая ударно-волновая конфигурация, в последующие моменты падающая волна не может рассматриваться самостоятельно, без учета связанных с нею разрывов. В каждой новой точке поверхности будет взаимодействовать та конфигурация, которая образовалась на предыдущей стадии. По этой причине новая конфигурация может не соответствовать той, которая имела бы место в случае отражения одиночной падающей волны. Следовательно, рассмотренные выше граничные линии не следует рассматривать как границы перехода, т.е. как линии, на которых происходит смена типов конфигураций в нестационарном процессе. При определении условий перехода необходимо учитывать тот факт, что не одиночная волна, но ударно-волновая конфигурация будет принимать участие в новом процессе. Параметры перехода должны зависеть от параметров той конфигурации, которая будет являться начальной для новых условий взаимодействия. Подтверждением данной концепции могут служить результаты исследования отражения ударной волны от двойного клина [5], где показана зависимость параметров перехода от разности углов двугранного клина.

Изложенная в настоящей работе точка зрения будет развита в следующих публикациях.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 09.

Список литературы

- [1] *Ben-Dor G.* // Handbook of shock waves. Academic press, 2001. 792 p.
- [2] *Sabannes H.* // Onera Publications. 1955. N 80. 36 p.
- [3] *Семенов А.Н.* // Препринт ФТИ АН СССР. 1986. № 1005–1007. 134 с.
- [4] *Voinovich P.A.* // Two-dimensional locally adapted unstructured unsteady Euler code. St. Petersburg. Advanced Technology Center. 1993 (unpublished).
- [5] *Ben-Dor G., Dewey J.M., Takayama K.* // J. Fluid Mech. 1987. P. 483–520.