

Классификация разновидностей отражения ударной волны от клина.

Часть 1. Границы и области существования различных типов отражения

© **А.Н. Семенов**, М.К. Березкина, И.В. Красовская

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: i.kras@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 17 июня 2008 г.)

Предложена классификация различных форм отражения ударной волны от бесконечного клина. В основе классификации лежит представление об отражении ударной волны как совокупности двух подпроцессов: отражения фронта волны от наклонной поверхности и обтекания носика клина спутным потоком. При определении типа отражения учитываются изменения в формах отраженной ударной волны, ствола Маха и контактного разрыва ударно-волновой конфигурации. Указываются границы и области существования различных типов отражения. Для некоторых разновидностей отражения вводятся новые названия.

PACS: 47.40.Nm, 46.40.Cd

Введение

За 130 лет интенсивного изучения отражения ударных волн попытки создать классификацию типов отражения делались неоднократно. Первым был Э. Мах [1], открывший явление отражения и зарегистрировавший два типа отражения. Результатом правильного, или регулярного, отражения является двухударная конфигурация. Трехударная конфигурация возникает в случае отражения, которое было названо маховским. Позже Нейман [2] сформулировал двух- и трехударные теории отражения. Он же высказал идею о том, что отражение может быть правильным и неправильным (как альтернатива правильному), а маховское отражение есть одно из возможных типов неправильного отражения. Нейман качественно описал вид неправильного отражения, который определенно назвал немаховским и который впоследствии получил название „отражение Неймана“ [3,4].

Курант и Фридрихс [5] теоретически показали, что в зависимости от направления движения тройной точки маховское отражение может быть разделено на три типа. Соответствующие типы было предложено называть простым маховским (тройная точка движется от поверхности), стационарным маховским (тройная точка движется параллельно поверхности) и обращенным маховским отражением (тройная точка движется по направлению к поверхности). Отметим, что газодинамический смысл указанных конфигураций не анализировался, и поэтому не совсем ясно, все ли они могут быть отнесены к отражению.

По мере того как обнаруживались новые, более сложные конфигурации отражения, у которых возникали дополнительные газодинамические разрывы на отраженной ударной волне, появились названия: переходное маховское отражение, двойное маховское отражение, предельное двойное маховское отражение. Классифика-

ция форм маховского отражения дана в [6]. В обзоре [7], посвященном отражению ударных волн в псевдостационарных потоках, предлагается классификация, состоящая из пяти типов отражения:

- правильное отражение (regular reflection) **RR**,
- отражение Неймана (von Neumann reflection) **vNR**,
- простое маховское отражение (single-Mach reflection) **SMR**,
- переходное маховское отражение (transitional-Mach reflection) **TMR**,
- двойное маховское отражение (double-Mach reflection) **DMR**.

Основанием для данной классификации являлось только поведение отраженной ударной волны. Для определения критериев перехода **SMR** \Leftrightarrow **TMR** и **TMR** \Leftrightarrow **DMR** был использован подход, в основе которого лежит идея о том, что процесс взаимодействия ударной волны с клином есть совокупность двух подпроцессов: непосредственно отражения фронта падающей волны от наклонной поверхности и обтекания носовой части клина спутным потоком за падающей ударной волной.

Впервые данная идея была высказана Лоу [8]. Он же ввел, с помощью метода „меченых частиц“, понятие о границе раздела между процессами отражения и обтекания. Семенов А.Н. и Сыщикова М.П. [9] последовательно разрабатывали указанные соображения. Детально развитая идея об интерференции процессов отражения и обтекания при псевдостационарном отражении ударных волн позволила выделить типы отражения, кардинально отличающиеся по своим свойствам друг от друга.

Классификация типов отражений, насчитывающая девять наименований, представлена в [10]. К сожалению, указанная работа была опубликована на русском языке в ведомственном сборнике и не могла быть доступной для широкого круга исследователей. Настоящая

работа является продолжением [10]. При определении типов маховского отражения принимались во внимание изменения всех элементов классической трехударной конфигурации — отраженной ударной волны, стебля Маха и контактного разрыва. Предложена классификация разновидностей отражения. Указываются области определяющих параметров, в которых реализуются различные типы отражения.

Описание процессов отражения и обтекания

Рассмотрение отражения ударных волн от клина с точки зрения интерференции обтекания и отражения имеет смысл в том случае, когда эти процессы можно выделить в „чистом виде“ и найти границу между ними. Исчерпывающе данный вопрос рассмотрен в [9]. Здесь только напомним, что при изучении общей картины отражения предполагается, что на начальной стадии образуются две независимые (локальные) области течения, которые в последующие моменты времени будут взаимно искажать друг друга по законам задачи Римана (задачи о распаде произвольного разрыва).

На рис. 1 схематически изображены процессы обтекания и отражения без учета их взаимодействия друг с другом для двух случаев: дозвукового (рис. 1, *a*) и сверхзвукового (рис. 1, *b*) спутного потока за падающей ударной волной. Дополнительно к геометрической картине течения даны эпюры давления вдоль поверхности клина. В качестве изолированного процесса отражения представлена модель маховского отражения, описываемая теорией Кабанна [11]. Основным допущением в теории является постулат о перпендикулярности прямолинейного по всей длине стебля Маха отражающей поверхности клина. Неизбежным следствием допущения является то, что в этой модели около тройной точки существуют конечные по длине зоны однородных

параметров. Процесс обтекания носовой части клина, как видно из рис. 1, в обоих случаях сосредоточен в конечной области пространства, ограниченной с одной стороны границей раздела *B*, а с другой — фронтом некоторого импульса давления. Граница *B* в момент времени *t* находится на расстоянии

$$X_B = W \times t,$$

где *W* — скорость спутного потока за падающей ударной волной. Фронт импульса давления в случае дозвукового спутного потока есть простая волна сжатия, а для сверхзвукового обтекания — нестационарная отошедшая головная ударная волна. Как было показано в [9], при взаимодействии с клином ударных волн, имеющих дозвуковой спутный поток, давление *p_b* на границе раздела между обтеканием и отражением всегда меньше давления *p₁* в спутном потоке. При сверхзвуковом спутном потоке за падающей волной и углах клина, больших предельного, давление обтекания *p_b* на границе раздела всегда больше давления *p₁* в спутном потоке. Особенности отражения ударной волны от клина будут определяться видом импульса давления, посылаемого из носика клина в тройную точку конфигурации отражения, а также способностью импульса давления достигать тройной точки. Очевидно, что требуемый анализ необходимо проводить с помощью характерных границ процессов отражения и обтекания.

Границы и области разновидностей отражения

На рис. 2 суммированы современные представления о разновидностях псевдостационарного отражения ударной волны от клина, базирующиеся на экспериментальных данных и результатах численного моделирования [6,7,9,10,12–15]. Здесь *I*, *R* и *M* — падающая, отраженная ударные волны и ствол Маха соответственно; *C* — контактный разрыв; *T*, *t_R* и *t_M* — основная и дополнительные тройные точки; *α* — угол падения ударной волны на поверхность; *β* — угол клина, *χ* — угол падения ударной волны на траекторию тройной точки *T*. На рис. 2, *a* дана схема правильного отражения **RR**, на рис. 2, *b* — тривиального маховского отражения **TrMR**, на рис. 2, *c* — отражения Неймана **vNR**. Различные типы маховского отражения **MR** представлены на рис. 2, *d–j*. Течение, возникающее при псевдостационарном отражении ударной волны от клина, определяется параметрами *β*, *M_s* и *γ*, где *M_s* — число Маха падающей ударной волны и *γ* — отношение удельных теплосемостей газа. Напомним важнейшие характерные граничные линии для локальных процессов отражения ударной волны от наклонной поверхности и обтекания носовой части клина спутным потоком за падающей ударной волной. Для газа с *γ* = 1.29 они представлены на рис. 3.

Для удобства пользования графиком, на второй оси абсцисс отложена величина *ξ* — относительное уплот-

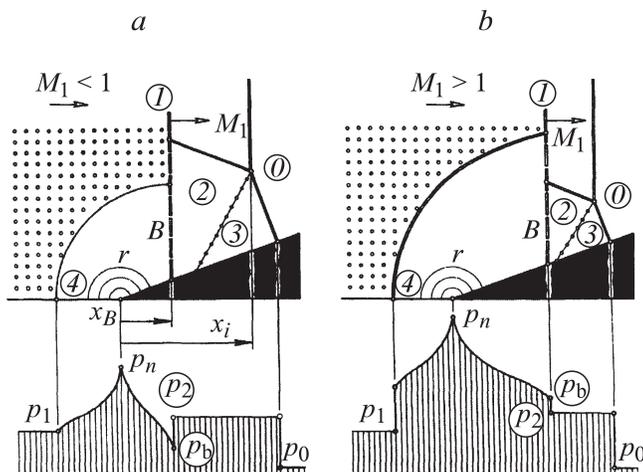


Рис. 1. Процессы отражения и обтекания при взаимодействии ударной волны с клином.

данным является то, что область собственно маховского отражения захватывает два характерных участка $idtbi$ и $thBEet$ правильного отражения, и следовательно, возникает вопрос о дуализме отражения при соответствующих определяющих параметрах. Кроме того, область маховского отражения не покрывает обширной зоны $admnCza$ неправильного отражения, для которой остается открытым вопрос о виде отражения в реальных условиях. Данная область определяющих параметров является полем испытания различных эвристических решений, простейшим из которых можно назвать тривиальное маховское отражение (ось az на рис. 3). Оно построено из простейших газодинамических соображений. Следует сказать, что модель тривиального маховского отражения прекрасно описывает реальный процесс отражения слабых ударных волн на тонком клине [16].

Интересны области $ibtdi$ и $thBEet$, где теоретически возможно как правильное, так и маховское отражение. Первая область, целиком расположенная в диапазоне малых чисел Маха, вероятно, никем тщательно не анализировалась, и, вообще говоря, игнорируется. Возможно, это связано с тем, что маховское отражение в этой области обладает сомнительным свойством — в рассматриваемом случае отраженные ударные волны являются волнами сильного семейства. Тем не менее ситуация здесь ничем не хуже той, что существует в прилегающей снизу к участку dt границы E области собственно маховского отражения. Весьма примечательное свойство анализируемой области — она целиком вложена в область аномального правильного отражения $afeta$, т.е. такого процесса, в котором давление отражения превышает значение при ударном торможении потока (при лобовом отражении ударной волны). Вторая область двойного решения $thBEet$ является объектом пристального внимания исследователей. Тот факт, что в случае псевдостационарных процессов в области $thBEet$ реализуется правильное отражение, а для нестационарных процессов формирование конкретного типа отражения (RR или MR) в смешанной области зависит от предьстории, впервые был зарегистрирован в [17]. К настоящему моменту вполне недвусмысленно установлено [17–22], что если нестационарный процесс протекает в направлении $RR \rightarrow MR$, то в смешанной области наблюдается правильное отражение. Для нестационарных отражений с направленностью процессов $MR \rightarrow RR$ в области $thBEet$ имеет место маховская форма.

Особого внимания заслуживает вопрос о параметрах перехода $MR \Leftrightarrow RR$. Полагаем, что для псевдостационарных течений границы B и E , приведенные на рис. 3, могут рассматриваться как линии перехода $MR \Leftrightarrow RR$. В случае нестационарных течений в ходе одного процесса имеет место не отражение одиночной ударной волны, а последовательное отражение ударно-волновых конфигураций [23]. Границы B и E существования разных типов псевдостационарного отражения не могут трактоваться как линии перехода в нестационарных течениях.

Это подтверждают эксперименты по отражению ударной волны от двугранного клина [20] и от криволинейных поверхностей [14,24].

Анализ разновидностей маховского отражения

Для того чтобы дать характеристику и определить особые свойства разновидностей псевдостационарного маховского отражения, необходимо выяснить, какой импульс возмущения (сжатия или разрежения) посылается из окрестности носика клина в точку отражения, и может ли этот импульс догнать тройную точку. Требуемый анализ был проведен с использованием границ дозвукового течения за отраженной ударной волной (линия S , рис. 3) и дозвукового спутного потока за падающей (линия V , рис. 3). Обращение к названным границам позволило выделить следующие характерные режимы псевдостационарного взаимодействия ударной волны с клином: чисто дозвуковое, смешанное дозвуковое–сверхзвуковое, смешанное сверхзвуковое–дозвуковое и чисто сверхзвуковое.

При чисто дозвуковом взаимодействии (область $adskva$) поток за падающей и за отраженной волнами одновременно дозвуковой. Данный процесс характеризуется тем, что из области обтекания вблизи носика клина в тройную точку посылается импульс разрежения, который беспрепятственно достигает последней. Результатом этого является искажение картины отражения, проявляющееся в искривлении всех разрывов трехударной конфигурации. Более внимательный анализ области данного вида отражения на плоскости определяющих параметров приводит к заключению о наличии особенностей рассматриваемого процесса. Действительно, при анализе парадокса Неймана маховского отражения [3] было обращено внимание на подобласть $amnva$, являющаяся частью области неправильного, но не маховского отражения $aimnCza$.

Процесс взаимодействия ударной волны с клином в области $amnva$ примечателен тем, что, во-первых, отраженная волна должна образоваться в результате поворота дозвукового потока и, во-вторых, обтекание клина в окрестности носика является дозвуковым. Оба фактора натолкнули на мысль, что при данных условиях в процессе отражения будет возникать не ударная волна, а простая волна сжатия. Модель такого типа отражения, которое называется отражением Неймана vNR , показана на рис. 2, *c*. В подобласти $dsknmd$ собственно маховского отражения будет реализовываться тип, схематически показанный на рис. 2, *d*. Следует обратить внимание на ориентацию выпуклости или вогнутости каждого разрыва относительно направления его движения. Основываясь на том, что данный тип отражения был впервые зафиксирован в экспериментах Смита [25], его можно называть простым отражением Маха–Смита $SM-SR$.

Смешанное дозвуковое–сверхзвуковое взаимодействие, реализующееся в области $kshgk$, характеризуется тем, что за отраженной ударной волной течение сверхзвуковое относительно тройной точки и, следовательно, никакое возмущение из носика клина не может догнать тройную точку. В области $kshgk$ указанным возмущением является импульс разрежения. В этом случае картина отражения такова, как на рис. 2, *e*. Данная разновидность отражения в наибольшей степени отвечает идеализованным представлениям о таком процессе. Для нее можно использовать следующее название: одинарное отражение Маха–Кабанна **SM–CR**.

При смешанном сверхзвуковом — дозвуковом взаимодействии (область $vkSzv$) из носика клина посылаются импульсы сжатия, который беспрепятственно догоняет тройную точку и искажает конфигурацию отражения. При этом все газодинамические разрывы будут искривлены по всей длине. Характер искривления разрывов таков, как показано на рис. 2, *f*. Необходимо заметить, что до настоящего момента существует утверждение, что контактный разрыв при воздействии импульса сжатия сворачивается в спиральный вихрь [9,15]. В данной работе высказывается гипотеза, что поведение контактного разрыва не связано с образованием вихря. Импульс сжатия заставляет пристеночную часть контактного разрыва разворачиваться в сторону стебля Маха и отходить от поверхности клина. Газ из области обтекания продвигается вдоль стенки вперед. Чтобы отделить газ из области обтекания от газа, расположенного за стеблем Маха, непосредственно у стенки возникает дополнительный контактный разрыв.

Непривычная форма контактного разрыва, изображенная на рис. 2, *h*, является следствием связки двух вышеуказанных контактных разрывов. Ниже будут приведены результаты, подкрепляющие данную точку зрения. Заметим, что свойства данного типа отражения, по видимому, гораздо богаче, чем они представляются на первый взгляд, потому что область существования этого типа отражения содержит подобласть $vlCzv$ неправильного отражения, которое здесь может реализоваться в непривычной форме.

Чисто сверхзвуковое взаимодействие (область $kghBsk$) характеризуется тем фактом, что из окрестности носика клина посылаются импульсы сжатия, который не может достигнуть тройной точки. Из этого импульса сжатия в потоке за отраженной ударной волной может сформироваться скачок уплотнения. Его взаимодействие с отраженной волной порождает дополнительную трехскачковую конфигурацию и вторую тройную точку на отраженной волне. Необходимость выяснить — полностью или частично скачок уплотнения блокирует зону маховского отражения от посторонних влияний. Можно ожидать, что псевдостационарное маховское отражение в области $kghBsk$ имеет существенные различия для больших и малых углов клина и эти различия связаны с рассмотренными выше особенностями процессов интерференции в смешанных областях $kshgk$ и $vkSzv$.

Поэтому разделив область $kghBsk$ горизонтальной линией L на две подобласти, можно надеяться обнаружить в каждой из них свой характерный тип взаимодействия.

Подобласть чисто сверхзвукового взаимодействия $kLSk$ граничит с зоной смешанного взаимодействия $vkSzv$, в которой интерференция локальных процессов отражения и обтекания вызывает деформацию контактного разрыва. Это значит, что в области $kLSk$ образование дополнительного скачка за отраженной ударной волной будет происходить, как правило, при уже деформированном контактном разрыве (рис. 2, *h*), т.е. дополнительный скачок не полностью защищает зону отражения от постороннего влияния процесса обтекания носика клина, допуская это воздействие в пристеночной области течения. Реализующаяся в области $kLSk$ разновидность псевдостационарного маховского отражения можно назвать двойным отражением Маха–Уайта **DM–WR**, поскольку данная разновидность впервые была зарегистрирована в экспериментах Уайта [26]. С усилением интенсивности падающей ударной волны влияние обтекания может быть настолько значительным, что не только контактный разрыв, но и ствол Маха основной маховской конфигурации искривляется вплоть до образования излома и появления тройной точки (рис. 2, *j*). Соответствующая разновидность отражения может быть названа тройным отражением Маха–Уайта **TM–WR**.

Подобласть чисто сверхзвукового взаимодействия $khBLk$ примыкает к области смешанного взаимодействия $kshgk$, в которой наблюдается тип отражения Маха–Кабанна. Это означает, что картина маховского отражения на больших клиньях при переходе из области $kshgk$ в область $khBLk$ будет характеризоваться тем, что в угловой зоне течения между отраженной волной и контактным разрывом будет формироваться новая ударная волна и вторая тройная точка t_R , из которой будет исходить новый контактный разрыв. Контактный разрыв основной трехударной конфигурации остается невозмущенным. Данная разновидность может быть названа двойным маховским отражением Маха–Кабанна **DM–CR** (рис. 2, *g*).

Поскольку процесс псевдостационарного маховского отражения в двух смежных областях $kshgk$ и $khBLk$ обладает рядом общих свойств, можно две области объединить в одну — $shBLks$, отражение в которой можно было бы называть отражением Маха–Кабанна, различая одинарное **SM–CR** и двойное **DM–CR** отражение Маха–Кабанна.

В экспериментах [27,28] был зафиксирован тип отражения, схематически показанный на рис. 2, *i*. Lee & Glass [28] классифицировали его как предельный случай двойного маховского отражения, когда вторая тройная точка лежит на поверхности клина. Данный тип отражения был получен в газах со сложной внутримолекулярной структурой, т.е. в газах с низким показателем адиабаты γ , таких как фреон-12 или гексафторид серы

SF₆, и получил название терминальное двойное маховское отражение **TDMR** (terminal double-Mach reflection).

Заключение

Представлена классификация разновидностей псевдостационарного отражения ударной волны от клина, насчитывающая десять наименований. При определении типа отражения учитывалось поведение не только отраженной ударной волны, но также контактного разрыва и стебля Маха. Указаны области существования различных форм отражения. Предложены новые названия разновидностей отражения ударной волны от клина. Высказывается предположение о том, что поведение пристеночной части контактного разрыва не связано с возникновением вихря.

Список литературы

- [1] *Mach E.* // Sitzungsbr. Acad. Wiss. Wien. 1878. Vol. 78. P. 819–838.
- [2] *Neumann J. von.* // Collected works. Oxford–London–N.Y.–Paris: Pergamon Press, 1963. 427 p.
- [3] *Семенов А.Н.* Препринт 1159. Л.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 1987. 49 с.
- [4] *Colella P., Henderson L.F.* // JFM. 1990. Vol. 213. P. 71–94.
- [5] *Courant R., Friedrichs K.* Supersonic Flow and Shock Waves. NY: Interscience, 1948.
- [6] *Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г.* и др. Нестационарное взаимодействие ударных и детонационных волн в газах. М.: Наука, 1986. 206 с.
- [7] *Ben-Dor G.* // Proc. 25th ISSW. Bangalore, India. 2005. P. 21–30.
- [8] *Law C.K.* UTIAS Tech. Note 150. Toronto, Canada, 1970.
- [9] Семенов А.Н., Сыщикова М.П. // ФГВ. 1975. Вып. 4. С. 596–608.
- [10] *Семенов А.Н.* // Нестационарные течения газов с ударными волнами. Л.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 1990. С. 162–172.
- [11] *Sabannes H.* // ONERA Publication. 1955. N 80. P. 1–36.
- [12] *Баженов Т.В., Гвоздева Л.Г.* Нестационарное взаимодействие ударных волн. М.: Наука, 1977. 274 с.
- [13] *Ben-Dor G.* Shock wave reflection phenomena. NY: Springer-Verlag, 1992. 307 p.
- [14] *Ben-Dor G., Igra O., Elperin T.* Handbook of shock waves. Vol. 2. San Diego: Academic Press, 2001. 792 p.
- [15] *Семенов А.Н., Сыщикова М.П., Березкина М.К.* // ЖТФ. 1970. Т. 40. Вып. 5. С. 1033–1043.
- [16] *Dewey J., McMollin D.* // JFM. 1985. Vol. 152. P. 49–81.
- [17] *Syshchikova M.P., Krassovskaya I.V.* // Arch. Mech. 1979. Vol. 31. N 1. P. 135–145.
- [18] *Henderson L.F., Lozzi A.* // JFM. 1979. Vol. 96. Pt 3. P. 541–559.
- [19] *Takayama K., Ben-Dor G., Gotoh J.* // AIAA J. 1981. Vol. 19. N 9. P. 1238–1240.
- [20] *Ben-Dor G., Dewey J.M., Takayama K.* // JFM. 1987. Vol. 176. N 3. P. 483–520.
- [21] *Ben-Dor G., Dewey J.M.* et al. // Experiments in Fluids. 1988. N 6. P. 439–434.
- [22] *Сыщикова М.П., Березкина М.К.* // Нестационарные течения газов с ударными волнами. Л.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 1990. С. 152–161.
- [23] *Красовская И.В., Березкина М.К.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 4. С. 88–94.
- [24] *Сыщикова М.П., Семенов А.Н., Березкина М.К.* // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. Вып. 2. С. 61–66.
- [25] *Smith L.G.* NORC Rep. A-350, Washington DC, USA, 1945.
- [26] *White D.E.* Tech. Rep. II-10, Princeton, NJ, USA, 1951.
- [27] *Ikui T., Matsuo K., Aoki T., Kondoh N.* // Bull. Jpn Soc. Mech. Eng. 1982. Vol. 25. N 208. P. 1513–1520.
- [28] *Lee J.-H., Glass I.I.* // Prog. Aerospace Sci. 1984. Vol. 21. P. 33–80.