

УДК 533.6.011.72

**ПЕРЕХОД ОТ МАХОВСКОГО ОТРАЖЕНИЯ К РЕГУЛЯРНОМУ
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН
С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ**

ГВОЗДЕВА Л. Г., ЛАГУТОВ Ю. П., ФОКЕЕВ В. П.

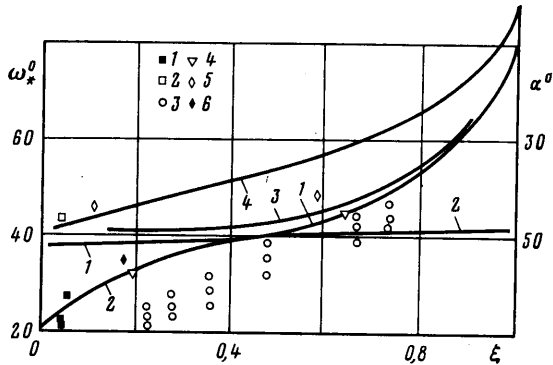
Экспериментально исследован процесс взаимодействия сильных ударных волн с цилиндрическими круговыми выпуклыми и вогнутыми поверхностями. Рассматривается влияние геометрических характеристик отражающей поверхности на процесс взаимодействия. Выявлены некоторые закономерности процесса и проведено сравнение полученных результатов с результатами других авторов.

1. Постановка задачи. При взаимодействии ударных волн с плоскими поверхностями, в зависимости от угла между фронтом волны и отражающей поверхностью — угла падения ω , наблюдается два вида отражения: регулярное или маховское [1]. Предельное значение угла падения, при котором еще возможно регулярное отражение, определяется с помощью двухударной теории. Зависимость этого угла от интенсивности ξ падающей ударной волны представлена на фиг. 1 кривой 1 [1]. Предельное значение угла падения, при котором еще возможно маховское отражение, определяет трехударная теория (фиг. 1, кривая 2) [1]. Как видно на фиг. 1, между кривыми 1 и 2 существует область значений ω , допускающая как регулярное, так и маховское отражение. Экспериментальные значения угла перехода от маховского отражения к регулярному на плоскости представлены на фиг. 1 кривой 3 [2].

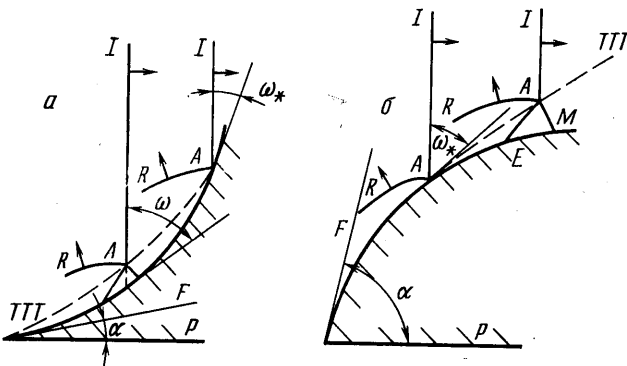
Процесс отражения ударных волн от плоскости является автомодельным [1]. При взаимодействии плоской ударной волны с круговой цилиндрической поверхностью угол падения ω между фронтом ударной волны и поверхностью отражения непрерывно меняется во времени. Так же непрерывно меняется и конфигурация систем волн, образующихся при отражении. Таким образом, нестационарный процесс отражения плоской ударной волны от цилиндрической поверхности является неавтомодельным. При этом происходит переход от одного вида отражения к другому как на вогнутой, так и на выпуклой цилиндрических поверхностях, если поверхность включает область перехода.

На фиг. 2, а, б показаны последовательные положения систем волн, образующихся при взаимодействии падающей ударной волны с вогнутой и выпуклой цилиндрическими поверхностями. При отражении от вогнутой цилиндрической поверхности происходит вначале маховское отражение, затем, начиная с некоторого критического угла падения ω_* , регулярное, а при отражении от выпуклой поверхности, наоборот, сначала регулярное, потом маховское.

Важным моментом при рассмотрении явления отражения ударной волны от поверхности является определение угла перехода от одного типа отражения к другому, а также выяснение зависимости этого угла от различных условий. Теоретическому и экспериментальному исследованию этого вопроса в применении к отражению ударных волн от круговых цилиндрических поверхностей посвящены работы [3—10].



Фиг. 1



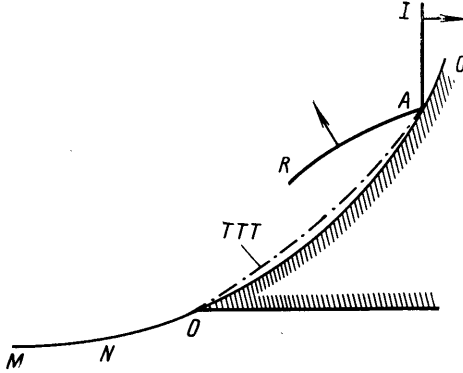
Фиг. 2

В [3] приведены результаты изучения процесса взаимодействия плоских ударных волн в воздухе с выпуклыми круговыми полуцилиндрическими поверхностями радиусов 12, 75 и 100 мм. При этом ω менялся от 0 до 180° . Определена зависимость угла перехода ω_* от интенсивности первичных ударных волн ξ (фиг. 1, кривая 4). На фиг. 1 приведены также результаты [5] экспериментального исследования отражения плоских ударных волн от круговых цилиндрических поверхностей: выпуклой с диаметром 260 мм (точки 5) и вогнутых с диаметрами 145 и 380 мм (точки 4 и 6 соответственно).

Оказалось, что углы перехода для выпуклых поверхностей (кривая 4, точки 5 на фиг. 1) расположены выше кривой $\omega_*(\xi)$ для плоскости (кривая 3), а для вогнутых поверхностей — ниже (точки 4, 6). Однако в работах [6, 9], а затем и в [4] утверждается, что так как точно определить точку перехода оптическим путем невозможно, то это расхождение в результатах кажущееся, а переход во всех случаях происходит в соответствии с кривой 2 на фиг. 1. Отсюда следует, что локальный угол между фронтом ударной волны и поверхностью, при котором происходит переход от одного типа взаимодействия к другому, полностью определяется интенсивностью падающей ударной волны.

В данной работе рассматривается зависимость этого угла не только от ξ , но и от предыстории процесса взаимодействия, определяемой геометрией поверхности отражения. Вполне характеризуют отражающую выпуклую или вогнутую круговую цилиндрическую поверхность ее радиус r и угол α между плоскостью P , пересекающей цилиндр параллельно его

оси, и касательной к цилиндру плоскостью F на линии пересечения поверхностей (фиг. 2, а, б). Падающая ударная волна ориентирована относительно отражающей поверхности так, что в каждый момент времени ее фронт параллелен оси цилиндра и перпендикулярен секущей плоскости P . В [7, 8] исследовалось влияние геометрических характеристик отражающей цилиндрической поверхности на угол перехода ω_* . При этом была обнаружена зависимость ω_* от угла α для сильных ударных волн в диапазоне $2,5 < M_0 < 6,5$, где зависимость угла перехода от интенсивности несущественна [1].



Фиг. 3

ударной трубе квадратного сечения (72×72 мм). Модели с вогнутой или выпуклой круговой цилиндрической поверхностью устанавливались в экспериментальную камеру, приспособленную для визуализации процесса взаимодействия. Радиусы отражающих поверхностей выбирались с тем условием, что при выбранном угле α на модели, помещенной в экспериментальную секцию, происходило как маховское, так и регулярное отражение. Были выбраны удовлетворяющие этому требованию вогнутые поверхности со следующими параметрами α° и r , мм: (0; 72), (6; 100), (28; 100) и выпуклая поверхность с $\alpha=71^\circ$ и $r=123$ мм. Для того чтобы получить $\alpha=0$ и исключить влияние носика модели на процесс отражения, была изготовлена специальная модель. В заготовке делалась круговая цилиндрическая полость с радиусом $r=72$ мм. Затем заготовка по плоскости, проходящей через ось цилиндра, делилась на две части. Из одной из этих частей изготовлялась модель путем сведения поверхности взаимодействия до профиля, показанного на фиг. 3 линией $MNOC$. Исследование процесса отражения проводилось оптическими методами по схемам, описанным в [4, 11], с подсветкой искровым разрядником или лазером ОГМ-20. В результате экспериментов были получены теневые картины, интерферограммы и голограммы процесса взаимодействия ударных волн с цилиндрическими поверхностями в различные моменты времени. Для обеспечения надежности результатов с каждой поверхностью проводилось 20–30 экспериментов с фиксацией положения волны на поверхности в различных ее точках.

Полученные снимки обрабатывались на микроскопе УИМ-23. Обработка заключалась в определении параметров характерных точек и углов в конфигурациях, образующихся при взаимодействии ударных волн с круговыми цилиндрическими поверхностями в различные моменты времени. Для определения угла перехода ω_* фиксировались координаты тройных точек на каждом снимке и по ним строились траектории тройных точек (линии TTT на фиг. 2, а, б и 3). Пересечением траектории тройной точки с поверхностью определяется угол перехода ω_* . На фиг. 2 представлен вид траектории движения тройной точки для вогнутой отражающей поверхности с $\alpha=28^\circ$.

Такой метод определения не дает точного значения угла перехода, так как расстояние между тройной точкой и поверхностью по мере уменьшения маховской ножки становится настолько малым, что его невозможно обнаружить оптическими методами. В связи с этим в данной работе определялась граничная кривая на координатной плоскости (ω_* , α), с одной стороны которой находились действительные углы перехода, а с другой стороны их не могло быть, так как здесь во всей области углов была явно видимой тройная конфигурация. Эта граница определялась с точностью $\pm 0,5^\circ$.

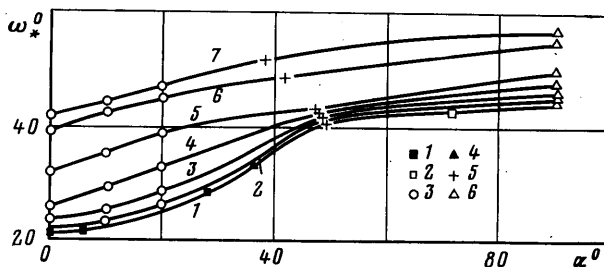
Оказалось, что как для выпуклых, так и для вогнутых цилиндрических отражающих поверхностей все ω_* для волн одинаковой интенсивности ложатся на одну кривую $\omega_*(\alpha)$.

В настоящей работе проведены дополнительные исследования зависимости угла перехода ω_* от угла α и от радиуса r и сравнены полученные результаты с данными вновь появившихся работ [9, 10].

2. Эксперименты. Экспериментальное исследование процесса взаимодействия сильных ударных волн с криволинейными поверхностями в воздухе и азоте ($M_0=4,2-6,7$) проводилось в

3. Анализ результатов. Полученные в результате обработки экспериментальных данных углы перехода от одного типа отражения к другому были нанесены на фиг. 4 точками 1, характеризующимися следующими значениями M_0 , α° и r , мм: (5,6–6,0; 0; 72), (6,5–6,7; 6; 100), (4,2–4,4; 28; 100) для вогнутых поверхностей и (6,3–6,7; 71; 123) для выпуклой поверхности (точка 2). На эту же плоскость были нанесены экспериментальные точки 5 ($M_0=6$; $r=\infty$) из [3] для плоскости и 6 ($M_0\sim 6$; $\alpha=90^\circ$; $r=12$; 75 и 100) из [5] для выпуклой поверхности.

Оказалось, что через эти точки можно провести кривую (кривая 1 на фиг. 4), которая делит координатную плоскость (ω_* , α) на две области.



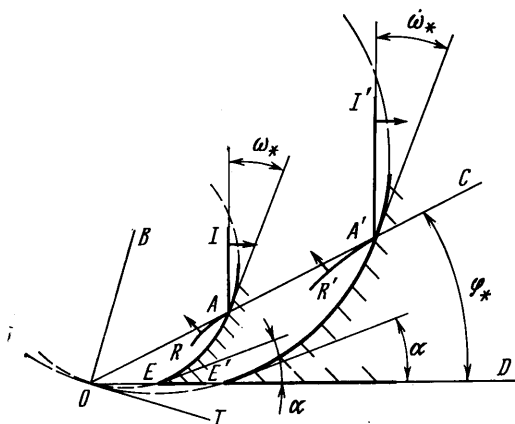
Фиг. 4

Над этой кривой область маховского отражения, в которой тройная конфигурация волн явно различима экспериментальными (оптическими) методами, а ниже этой кривой находится область регулярного отражения, область действительных углов перехода и область вероятного маховского отражения, не фиксируемого оптическими методами. Указанная кривая экспериментальных значений углов перехода получена для сильных ударных волн ($M_0=4,2-6,7$) и обнаруживает возрастающую зависимость от угла α . На эту кривую легли точки для выпуклых поверхностей с $r=12, 75, 100$ и 123 мм, для плоской поверхности с $r=\infty$ и для вогнутых поверхностей с $r=72$ и 100 мм.

В данной работе предполагается, что при фиксированном угле α угол перехода ω_* не зависит от радиуса отражающей поверхности во всем диапазоне изменения углов α . Действительно, пусть даны конфигурации, образующиеся при отражении ударных волн одинаковой интенсивности от вогнутых цилиндрических поверхностей с центрами на прямой OB и имеющих различные радиусы, но одинаковый произвольный угол α , равный углу DOT (фиг. 5). Пусть на фиг. 5 выделены две точки на фронтах ударных волн, касающиеся цилиндрических поверхностей в начальный момент взаимодействия ($\varphi=0$). По мере продвижения волны обе тройные точки отойдут под одинаковым углом к направлению движения падающей ударной волны, так как наклон касательных к поверхностям плоскостей в этих точках одинаков. Далее на эти точки будут действовать стационарные потоки с одинаковыми скоростями и направлением движения. Таким образом, проекция скоростей этих точек в каком-то фиксированном направлении будут одинаковы.

Очевидно, что и для любого φ точки после взаимодействия с поверхностью будут испытывать воздействие потоков, имеющих равные векторы скоростей, т. е. векторы скоростей отраженных точек будут зависеть от координаты φ , но не будут зависеть от радиуса поверхности. Расстояния, проходимые точками в фиксированном направлении после взаимодействия с поверхностями при одинаковом угле φ , будут равны скорости, одинаковой для обеих точек, умноженной на время, равное времени, за которое

падающая волна проходит расстояние от начала взаимодействия с цилиндрической поверхностью до точки, соответствующей рассматриваемому углу φ . Это время (τ) будет различным для поверхностей с различными r ,



Фиг. 5

а отношение отрезков, лежащих, например, на параллельных прямых, соответствующих углам φ' ($0 \leq \varphi' < \varphi_*$ на фиг. 5) и заключенных между отраженной ударной волной AR ($A'R'$) и поверхностью AE ($A'E'$), будет постоянным и не зависящим от φ' , т. е. конфигурации систем волн, образующихся при отражении ударных волн от цилиндрических поверхностей с одинаковыми α и разными r , будут подобны. Коэффициент подобия $K = \tau_2 / \tau_1$, где τ_1, τ_2 — время, за которое падающие ударные волны проходят расстояние от

точки E (E') до рассматриваемой точки, соответствующей угловой координате φ на фиг. 5. Произвольному углу φ на фиг. 5 можно поставить в соответствие бесконечное количество подобных конфигураций, соответствующих различным r . При некотором $\varphi = \varphi_* = COD$ все эти подобные конфигурации станут переходными, при этом угол перехода ω_* будет одинаков для всех этих поверхностей, что можно видеть на фиг. 5, т. е. угол перехода не зависит от r для данного α . Аналогично можно показать независимость ω_* от r при данном α для выпуклых поверхностей. Действительно, кривая I на фиг. 4 построена по экспериментальным данным, полученным при отражении ударных волн от выпуклых и вогнутых цилиндрических поверхностей с радиусом $r = 100$ мм. Однако на эту кривую легли точки, соответствующие различным радиусам отражающих поверхностей. Например, точка 5 [3], соответствующая перемене знака кривизны поверхности, будет точкой перехода от маховского отражения к регулярному при взаимодействии ударной волны с вогнутой поверхностью ($r = 100$ мм), при этом $\omega_* = \omega_0$ ($\omega_0 = \pi/2 - \alpha$); эта же точка будет точкой перехода от регулярного отражения к маховскому при взаимодействии ударной волны с выпуклой поверхностью ($r = 100$ мм), при этом также $\omega_* = \omega_0$; эта же точка будет соответствовать и углу перехода ω_* на плоской ($r = \infty$) поверхности. Для этого угла α на фиг. 4, соответствующего переходу на клине, независимость ω_* от радиуса очевидна (так как для поверхностей любого r — вогнутых и выпуклых — угол $\omega_* = \omega_0 = \text{const}$).

Влияние радиуса цилиндрической поверхности на отражение косвенно рассматривается в [9]. Так, чтобы показать, что в окрестности точки перехода маховское отражение можно принять за регулярное, приводятся два теневых снимка, на одном из которых изображено регулярное отражение от цилиндрической поверхности одного радиуса, а на другом — маховское отражение от поверхности другого радиуса, причем локальный угол падения одинаков. Отсюда делается вывод, что изображенное на снимке регулярное отражение — кажущееся, а на самом деле это маховское отражение, не фиксируемое в эксперименте из-за малых размеров волн Маха. Переход от одного типа отражения к другому, по мнению авторов [9], полностью определяется интенсивностью падающей ударной волны, а видимое на снимке регулярное отражение — кажущееся вплоть

до угла падения, определяемого по кривой «стационарного» маховского отражения (кривая 2 на фиг. 1).

Приведенные снимки можно прокомментировать следующим образом на основании полученных в [7, 8] и в настоящей работе результатов. На этих снимках изображены поверхности с различными углами α , и на том снимке, на котором угол α меньше, видна маховская конфигурация, а на поверхности с большим углом α — регулярная.

Экспериментальные точки 1, 2, полученные в настоящей работе, также нанесены на фиг. 1. Видно (фиг. 1 и 4), что углы перехода для $\alpha=0$ и 6° лежат ниже кривой 2 (фиг. 1) стационарного маховского отражения. Таким образом, получены изображения трехударной конфигурации в такой области, где ее не должно быть согласно [4–6, 9]. Так же ниже кривой 2 на фиг. 1 расположены точки перехода 3 [10] на вогнутой цилиндрической ($r=50$ мм) поверхности для более слабых ударных волн $0,4717 < \xi < 0,1825$. Возрастающие значения углов перехода данных точками 3 [10] на фиг. 1 при одинаковом ξ соответствуют значениям α , равным 0; 10 и 20° .

Точки 3 [10] и 4 [9] были также нанесены на координатную плоскость (ω_* , α) (фиг. 4) вместе с экспериментальными точками 5 для клина [3] и 6 для выпуклых цилиндрических поверхностей [4], взятыми при соответствующих интенсивностях ударных волн. Эти точки образуют семейство кривых (1–7) на фиг. 4 со значениями параметра ξ : 0,05; 0,22; 0,27; 0,35; 0,47; 0,67; 0,73 соответственно. Зная α и интенсивность ξ , можно определить знак кривизны поверхности и угол перехода ω_* , а зная ω_* и ξ , можно определить α и знак кривизны поверхности.

Таким образом, в данной работе для сильных ударных волн экспериментально показано, что для вогнутых круговых цилиндрических поверхностей процесс маховского отражения «затягивается» и переход к регулярному отражению происходит при углах падения, меньших, чем для плоскости, а для вогнутых поверхностей с $\alpha=0$ и 6° — при углах, меньших, чем углы перехода, соответствующие «стационарной» маховской конфигурации.

Экспериментально получена кривая зависимости $\omega_*(\alpha)$ для сильных ударных волн ($4,2 \leq M_0 \leq 6,7$), на которую легли точки перехода на вогнутых и выпуклых круговых цилиндрических поверхностях и перехода на плоскости.

Приведенные кривые зависимости $\omega_*(\alpha)$, построенные по данным других работ для менее сильных и слабых ($1,4 \leq M_0 \leq 2,2$) ударных волн, которые также показывают, что переход на вогнутых поверхностях затягивается (для некоторых значений α — до углов, меньших, чем углы, определяемые кривой стационарной маховской конфигурации).

Обосновывается предположение о независимости угла перехода от радиуса цилиндрической поверхности отражения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженова Т. В., Гвоздева Л. Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М.: Наука, 1977. 274 с.
2. Bleakney W., Taub A. H. Interaction of shock waves.— Rev. Mod. Phys., 1949, v. 21, № 4, p. 584–605.
3. Heilig W. H. Diffraction of a shock wave by a cylinder.— Phys. Fluids, 1969, v. 12, № 5, Suppl. 1, pt 2, p. 154–157.
4. Heilig W. H. A result concerning the transition from regular reflection to Mach reflection of strong shock waves.— In: Shock tube and shock wave research. Proc. 11th Int. shock tubes symp. Seattle, 1977. Seattle — London, 1978, p. 288–295.
5. Lozzi A., Henderson L. F. Experiments of reflections of plane shock waves at cylindrical surface.— In: Mod. develop. shock tube res. Proc. 10th Int. shock tubes symp. Kyoto, 1975, S. 1, 1975, p. 363–368.

6. *Henderson L. F., Lozzi A.* Experiments on transition of Mach reflexion.— *J. Fluid Mech.*, 1975, v. 68, № 1, p. 139–155.
7. *Гвоздева Л. Г., Лагутов Ю. П., Фокеев В. П.* Переход от регулярного отражения к маховскому при взаимодействии ударных волн с цилиндрическими поверхностями.— *Письма в Ж. техн. физ.* 1979, т. 5, вып. 13, с. 812–816.
8. *Gvozdeva L. G., Bazhenova T. V., Lagutov Yu. P., Fokeev V. P.* Shock wave interaction with cylindrical surfaces.— *Arch. Mech.*, 1980, v. 32, № 5, p. 693–702.
9. *Henderson L. F., Lozzi A.* Further experiments on transition to Mach reflection.— *J. Fluid Mech.*, 1979, v. 94, pt 3, p. 541–559.
10. *Shigeru Itoh, Matsuki Itaya.* On the transition between regular and Mach reflection.— *Shock tubes and waves. Proc. 12th Int. shock tubes symp. Ierusalem*, 1980, p. 314–329.
11. *Гвоздева Л. Г., Сухоруких В. С., Харитонов А. И., Лагутов Ю. П.* Применение голографического интерферометра для исследования дифракции ударных волн.— В кн.: Докл. 2-й Всесоюз. конф. по методам аэрофизических исследований. Минск, 1979, 79–81.

Москва

Поступила в редакцию
23.I.1980