УДК 532.529

ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТРАЖЕННОГО РАЗРЫВА В ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ДОГОНЯЮЩИХ СКАЧКОВ

–––––––

INTENSITY OF THE REFLECTED DISCONTINUITY IN THE INTERFERENCE OF UNIDIRECTIONAL SHOCK WAVES

Упырев Владимир Владимирович
аспирант кафедры Физики-2.
Университета ИТМО
Тел.: +7(950) 228-69-80
upyrevv@ya.ru

Аннотация. Исследованы ударно-волновые структуры, возникающие при интерференции догоняющих скачков уплотнения. Показаны возможные исходящие разрывы в результате такого взаимодействия. Исследована зависимость интенсивности отраженного разрыва от интенсивностей приходящих догоняющих скачков. Для случая, когда отраженный разрыв является разрывной характеристикой, построены области существования. Результаты исследования могут быть использованы студентами, изучающими аэрогазодинамику, и специалистами, занимающимися проектированием воздухозаборников.

Ключевые слова: скачок уплотнения, ударная волна, интерференция скачков уплотнения, скачки уплотнения одного направления, догоняющие скачки уплотнения.

Upyrev Vladimir Vladimirovich
Postgraduate.
ITMO University
Ph.: +7(950) 228-69-80
upyrevv@ya.ru

Annotation. Shock-wave structures, that appear in unidirectional shock waves interference was researched. Possible types of reflected discontinuity in were shown. Relation of intensity of the reflected discontinuity to an intensities of incoming shock waves was researched. Domains of existence of the case, when reflected discontinuity appears as discontinuous characteristic were given. Results can be used by students, who study fluid dynamics, and by specialists that design air intake.

Keywords: shock wave, interference of shocks, unidirectional shocks, catching up shock waves.

Введение

Цель – представить основные сведения о взаимодействии косых скачков уплотнения одного направления, дать классификацию отраженного разрыва, области существования различных его типов, показать численные данные интенсивности разрыва.

Косой скачок уплотнения это ударная волна, которая имеет нулевую скорость относительно наблюдателя. Можно показать математически [1], что стационарный случай косого скачка уплотнения аналогичен нестационарному случаю прямого скачка уплотнения, где скорость прямого скачка пропорциональна углу наклона косого скачка относительно невозмущенного потока. Взаимодействие косых скачков (рис. 1, б), которые аналогичны двум одномерным ударным волнам одного направления (рис. 1, а), называют интерференцией догоняющих косых скачков уплотнения.

Задача об интерференции скачков уплотнения рассматривалась ранее в работах [2], [3] и [4] . Было показано, что отраженный разрыв может иметь произвольную интенсивность в отличие от главного скачка, чья интенсивность строго больше единицы. Отраженный разрыв, чья интенсивность больше единицы, есть скачок уплотнения, который скачкообразно увеличивает давление в потоке, который через него протекает. Если отраженный разрыв имеет интенсивность меньше единицы, то такой разрыв является волной разрежения. Промежуточное состояние есть случай разрывной характеристики, она не изменяет давление и другие газодинамические переменные, но вызывает разрыв из производных.

Для того чтобы минимизировать потери полного давления в воздухозаборных устройствах внешнего сжатия необходимо использовать по возможности максимально возможное количество догоняющих скачков. С тем, чтобы такая система была структурно устойчивой необходимо, чтобы полученный в результате интерференции отра-

женный разрыв был скачком уплотнения [5], [6]. В работе [3] показано, что если отраженный разрыв будет волной разрежения, то ударно-волновая структура становится структурно неустойчивой.

Догоняющие скачки уплотнения используются в воздухозаборных устройствах внешнего сжатия. В большинстве случаев это система из 2–3 взаимодействующих догоняющих скачков, как показано на рисунке 1, б.

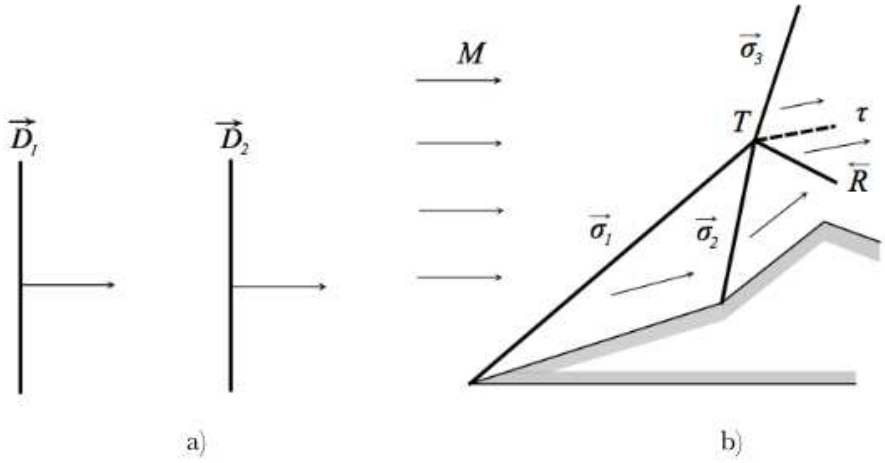

Рисунок 1 – Интерференция догоняющих скачков уплотнения:
a) нестационарный одномерный случай – догоняющие одномерные ударные волны;
b) стационарный двумерный случай – косые скачки уплотнения.
M – число Маха; *T* – тройная точка; σ_1, σ_2 – приходящие скачки уплотнения;
σ_3 – главный скачок уплотнения; *R* – отраженный разрыв; τ – тангенциальный разрыв

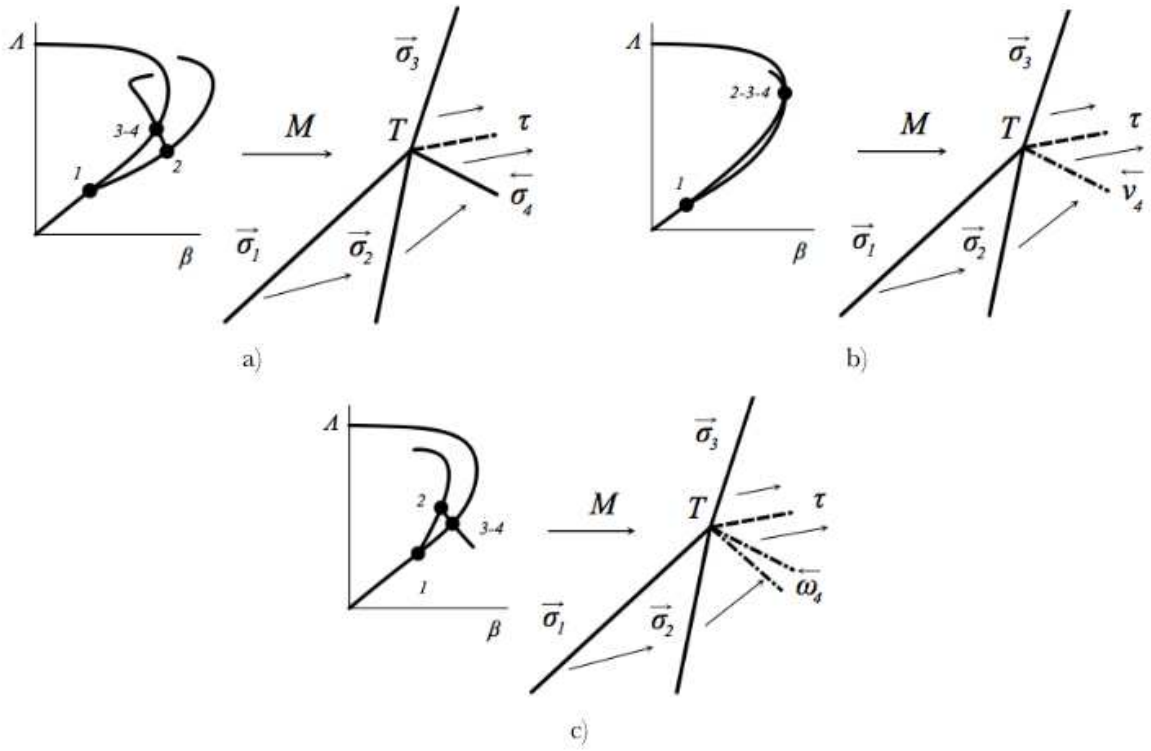

Рисунок 2 –Типы отраженного разрыва

В настоящей работе рассматриваются области существования различных типов отраженных разрывов, и интенсивность отраженного разрыва в целом при различных конфигурациях интенсивностей первого и второго приходящего скачка.

Математическая модель

Интенсивность отраженного разрыва J_4 вычисляется из условий [7], [8] :

при $$\overleftarrow{\sigma}_4:\ \beta_\sigma(M,J_4)+\beta_\sigma(\hat{M}_2,GJ_4)=\beta_\sigma(M,J_1)+\beta_\sigma(\hat{M}_1,J_2); \quad (1)$$

при $$\overleftarrow{\omega}_4:\ \beta_\sigma(M,J_4)-\beta_\sigma(\hat{M}_2,GJ_4)=\beta_\sigma(M,J_1)+\beta_\sigma(\hat{M}_1,J_2); \quad (2)$$

где $$G=(J_1J_2)^{-1};\ J_1\in[1;J_s];\ J_2\in[1;J_{2s}]; \quad (3)$$

$\hat{M}_i$ – число Маха за i-тым скачком уплотнения.

Углы отклонения потока в (1) и (2) вычисляются по формулам:

$$\beta_\sigma(J)=\operatorname{atan}\left(\sqrt{\frac{J_m-J}{J+\varepsilon}}\cdot\frac{(1-\varepsilon)\cdot(J-1)}{(J_m+\varepsilon)-(1-\varepsilon)\cdot(J-1)}\right); \quad (4)$$

$$\beta_\omega(J)=\omega\left\{\sqrt{\frac{2}{\gamma-1}\cdot\left(1+\frac{\gamma-1}{2}\cdot M^2\right)}\cdot J_\omega^{-\frac{\gamma-1}{\gamma}}-1\right\}-\omega_\infty. \quad (5)$$

где γ – показатель адиабаты, $\omega(M)$ – функция Прандтля-Майера [9] :

$$\omega(M)=\sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}\cdot\operatorname{arctg}\left(\sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\cdot(M^2-1)}\right)-\operatorname{arctg}\sqrt{M^2-1}, \quad (6)$$

а $\omega_\infty=\omega(M)$.

Результаты и анализ

С помощью уравнений (1) и (2) были получены результаты для воздуха (показатель адиабаты γ = 1,4). На рисунке 3 показана зависимость интенсивности отраженного разрыва от интенсивностей приходящих скачков уплотнения для средних интенсивностей первого приходящего скачка. Видно, что чем выше начальная интенсивность, тем меньше область, когда отраженный разрыв – скачок уплотнения.

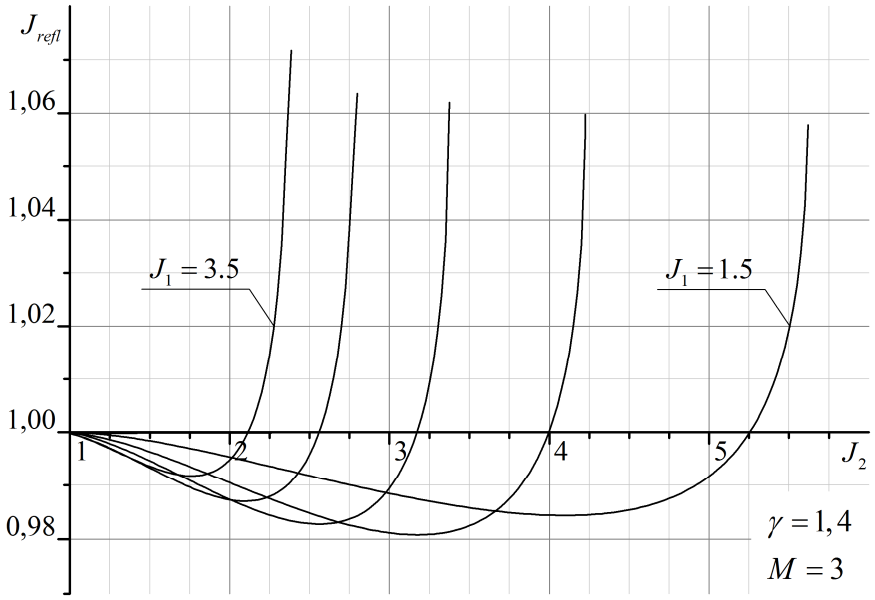

Рисунок 3 – Интенсивность отраженного разрыва J_{refl} для комбинации приходящих скачков уплотнения J_1, J_2. Показатель адиабаты равен 1,4, число Маха равно 3

В случае если интенсивность отраженного разрыва равна единице, отсутствует скачок давления. Комбинации J_1 – J_2, которая создает такие отраженные разрывы, называются характеристическими. Сплошная линия на рисунке 4. показывает интенсивности J_1 – J_2, при которой образуется разрывная характеристика. Важность данного результата заключается так же в том, что разрывная характеристика является границей между областями двух типов отраженного разрыва – скачка уплотнения (область B, рис. 4) и волны разрежения (область A, рис. 4).

Области существования характеристических ударно-волновых структур показаны на рисунке 5. На рисунке 5 показано, что небольшой отрезок разрывной характеристики при высокой интенсивности первого скачка J_1 (на рис. 4 J_1 ~ 5,4–5,6, J_2 ~ 1), смещается влево при снижении числа Маха невозмущенного потока. При низких числах Маха данный отрезок является единственной областью существования характеристических ударно-волновых структур (M ~ 1,5).

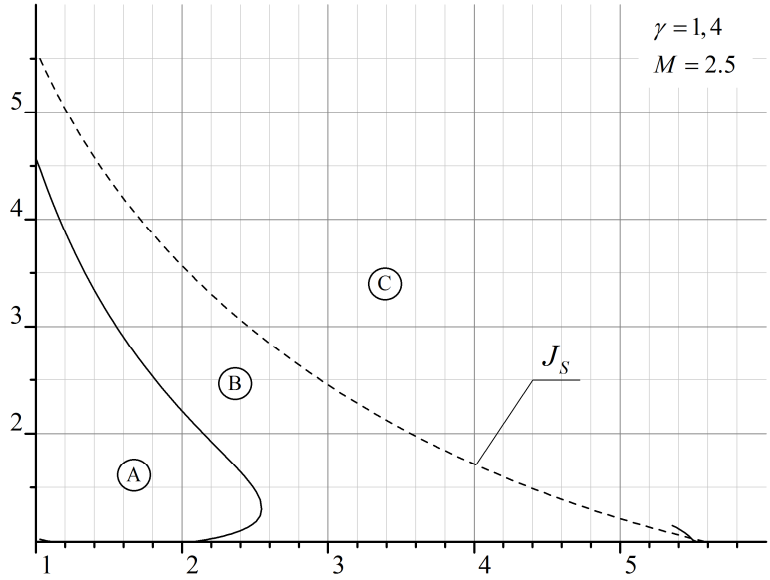

Рисунок 4 – Интенсивности комбинации приходящих скачков уплотнения J_1, J_2, для случая характеристического разрыва. J_S – интенсивность, соответствующая скорости потока за приходящими скачками равной скорости звука. Область A – отраженный разрыв – волна разрежения. Область B – отраженный разрыв – скачок уплотнения. Область C – отраженный разрыв отсутствует. Показатель адиабаты равен 1,4, число Маха равен 2,5

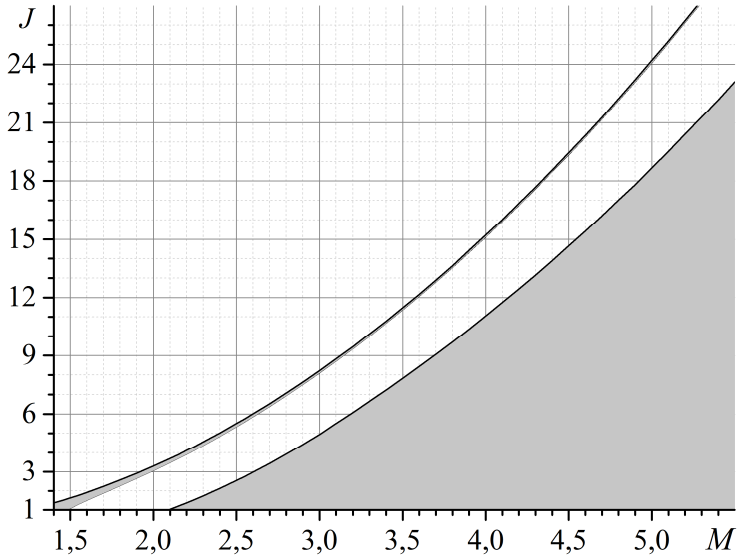

Рисунок 5 – Область существования разрывных характеристик от числа Маха и интенсивности первого скачка *J*. Показатель адиабаты равен 1,4

Заключение

Исследованы ударно-волновые структуры, возникающие при интерференции догоняющих скачков уплотнения. Показано, что в результате такого взаимодействия образуются два разрыва (волны): основной и отраженный. Отраженный разрыв может быть скачком уплотнения или волной разрежения. граничный случай – разрывная характеристика (разрыв с интенсивностью равной единице). Исследована зависимость интенсивности отраженного разрыва от интенсивностей приходящих догоняющих скачков. Для случая, когда отраженный разрыв является разрывной характеристикой, построены области существования.

Результаты исследования могут быть использованы студентами, изучающими аэрогазодинамику, и специалистами, занимающимися проектированием воздухозаборников.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.575.21.0057, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57514X0057).

Литература:

1. Булат П.В. Ударная и детонационная волна с точки зрения теории интерференции газодинамических разрывово-геометрический смысл уравнений газовой динамики сверхзвуковых течений // Фундаментальные исследования.

2. Bulat P.V., Uskov V.N. Shock and detonation wave in terms of view of the theory of interaction gasdynamic discontinuities // Life Science Journal. – 2014. – 11, 8s. – 307–10 С.

3. Bulat P.V., Uskov V.N., Arkhipova L.P. Classification of Gas-dynamic Discontinuities and their Interference Problems // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – 8, 22. – 2248–54 С.

4. Булат П.В., Денисенко П.В. Интерференция скачков уплотнения одного направления // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15. – № 3. – С. 500–508.

5. Булат П.В., Усков В.Н., О задаче проектирования идеального диффузора для сжатия сверхзвукового потока // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6 (Ч. 1). – С. 178–84. – URL : http://www.rae.ru/fs/pdf/2012/6-1/29961.pdf

6. Омельченко А.В., Усков В.Н. Оптимальные догоняющие скачки уплотнения с ограничениями на суммарный угол поворота потока // Прикладная механика и техническая физика. – 1999. – Т. 40. – № 4. – С. 99–108.

7. Росляков Г.С., Старых А.Л., Усков В.Н. Интерференция стационарных скачков уплотнения одного направления // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1987. – № 4. – С. 143–52.

8. Адрианов А.Л., Старых А.Л., Усков В.Н., Интерференция Стационарных Газодинамических Разрывов. – Новосибирск : ВО «Наука», 1995. – 178 с.

9. Bulat P.V., Uskov V.N., Arkhipova L.P. Gas-dynamic discontinuity conception // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – 8, 22. – 2255–59 С. – URL : http://www.maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2255-2259.pdf

References:

1. Bulat P.V. A shock and detonation wave from the point of view of the theory of an interference gasdynamic razryvovo-geometrical sense of the equations of gas dynamics of supersonic currents // Basic researches.

2. Bulat P.V., Uskov V.N. Shock and detonation wave in terms of view of the theory of interaction gasdynamic discontinuities // Life Science Journal. – 2014. – 11, 8s. – 307–10 P.

3. Bulat P.V., Uskov V.N., Arkhipova L.P. Classification of Gas-dynamic Discontinuities and their Interference Problems // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – 8, 22. – 2248–54 P.

4. Bulat P.V., Denisenko P.V. Interferention of jumps of consolidation of one direction // Scientific and technical messenger of information technologies, mechanics and optics. – 2015. – V. 15. – № 3. – P. 500–508.

5. Bulat P.V., Uskov V.N., About a problem of design of the ideal diffuser for compression of a supersonic stream // Basic researches. – 2012. – № 6 (Ch. 1). – P. 178–84. – URL : http://www.rae.ru/fs/pdf/2012/6-1/29961.pdf

6. Omelchenko A.V., Uskov V.N. The optimum catching-up jumps of consolidation with restrictions on a total angle of rotation of a stream // Applied mechanics and technical physics. – 1999. – V. 40. – № 4. – P. 99–108.

7. Roslyakov G.S., Staryh A.L., Uskov V.N. Interferention of stationary jumps of consolidation of one direction // Izv. Academy of Sciences of the USSR. MZhG. – 1987. – No. 4. – P. 143–52.

8. Adrianov A.L., Staryh A.L., Uskov V.N. Interference of Stationary Gasdynamic Gaps. – Novosibirsk : IN «Science», 1995. – 178 p.

9. Bulat P.V., Uskov V.N., Arkhipova L.P. Gas-dynamic discontinuity conception // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – 8, 22. – 2255–59 S. – URL : http://www.maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2255-2259.pdf