

УДК 629.7

ПЕРЕХОД ИЗ НЕРЕГУЛЯРНОЙ В РЕГУЛЯРНУЮ ИНТЕРФЕРЕНЦИЮ ДОГОНЯЮЩИХ СКАЧКОВ УПЛОТНЕНИЯ

TRANSITION BETWEEN REGULAR AND IRREGULAR INTERFERENCE OF CATCHING UP SHOCK WAVES

Упырев Владимир Владимирович
аспирант,
Университет ИТМО (г. Санкт-Петербург)
upyrevvv@yandex.ru

Продан Николай Васильевич
инженер,
Университет ИТМО (г. Санкт-Петербург)

Аннотация. В работе рассматривается проблема областей существования регулярной и маховской интерференции скачков уплотнения, разворачивающих поток в одну сторону. Такие скачки еще называют догоняющими по аналогии с ударными волнами, распространяющимися в одном направлении. Маховская интерференция догоняющих скачков является нерасчетным случаем для работы сверхзвуковых воздухозаборников внешнего сжатия, она может сопровождаться помпажем и другими нежелательными нестационарными явлениями. В работе приведен численный расчет интерференции догоняющих скачков и решение с помощью ударных поляр для типичных режимов крейсерского полета со сверхзвуковой скоростью. Обнаружены ударно-волновые структуры, о существовании которых ранее было неизвестно.

Ключевые слова: скачок уплотнения, догоняющие скачки, газодинамический разрыв, ударно – волновая структура.

Upyrev Vladimir Vladimirovich
Postgraduate,
ITMO University, Saint Petersburg
upyrevvv@yandex.ru

Prodan Nikolai Vasilievich
engineer,
ITMO University, Saint Petersburg

Annotation. This article focuses on the problem of interference type determination in the case of shock waves, which deflects stream in same direction. This interaction is also known as interference of catching up shock waves, analogous to a one-dimensional shock waves moving in same direction. Mach interference configuration of catching up shock waves is underexpanded case for supersonic airlet with external intake. Mach interference can be coupled with surge and other unwanted nonstationary phenomena. Numerical calculation combined with analytical calculation using shock polar methods for typical cruiser flight speed is presented. New shock wave structures were discovered.

Keywords: shock waves, catching up shock waves, fluid dynamic discontinuity, shock wave structure.

Введение

По аналогии с ударными волнами, распространяющимися в одну сторону (рис. 1, а), догоняющими называют взаимодействующие между собой скачки уплотнения, разворачивающие поток в одну сторону.

Догоняющие скачки в типичных случаях образуют в точке интерференции ударно-волновую структуру, состоящую из двух входящих скачков, главного исходящего скачка, отраженного разрыва, который может быть волной разрежения или скачком уплотнения и разделяющего главный и отраженный разрывы тангенциального разрыва (рис. 1, б). Изображенная на рисунке 1, б картина течения называется регулярной интерференцией (РИ) догоняющих скачков уплотнения (ДСУ). Теория РИ ДСУ подробно рассмотрена в [1].

Догоняющие скачки изучаются достаточно давно [2–4], но почти все исследования обходят вниманием маховскую интерференцию (МИ), сопровождающуюся образованием ножки Маха, течение за которой дозвуковое. Случай МИ в последнее время активно изучается для взаимодействия газодинамических разрывов [5–7], разворачивающих потоки в разных направлениях. Такие явления характерны для случая отражения скачка от оси симметрии [8] или твердой стенки [9]. Вообще, интерференция встречных скачков сопровождается таким явлением, как гистерезис [10], когда при одних и тех же параметрах возможна как РИ, так и МИ. Ниже аналогичная проблема изучается для случая ДСУ.

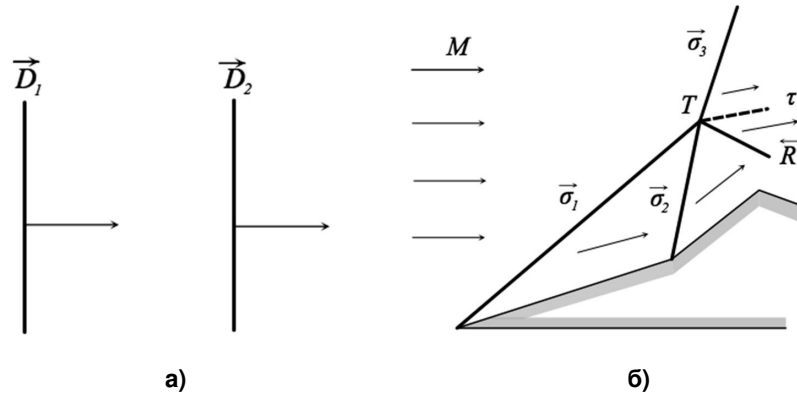


Рисунок 1 – Интерференция разрывов одного направления:

а – догоняющие одномерные ударные волны D_1 и D_2 , стрелками показано направление движения;
 б – косые догоняющие скачки уплотнения; M – число Маха; T – точка пересечения скачков уплотнения;
 R – отраженный разрыв; σ_1, σ_2 – догоняющие скачки уплотнения; σ_3 – главный скачок уплотнения,
 τ – тангенциальный разрыв; стрелками показаны линии тока, левая \leftarrow или правая \rightarrow стрелка
 над обозначением газодинамического разрыва означает, соответственно, левое или правое
 направление этого разрыва

Методика расчета

Интенсивность скачка уплотнения связана с углом разворота потока по следующей формуле:

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

где $\varepsilon = (\gamma - 1)/(\gamma + 1)$; γ – показатель адиабаты среды; J_m – максимальная интенсивность скачка уплотнения для данного потока, рассчитываемый по формуле:

$$J_m(M) = (1 + \varepsilon)M^2 - \varepsilon. \quad (2)$$

Скачок уплотнения замедляет поток на значение, которое зависит от интенсивности и числа Маха данного скачка:

$$M_1(J, M) = \sqrt{\frac{(J + \varepsilon)M^2 - (1 - \varepsilon)(J^2 - 1)}{J(1 + \varepsilon J)}}. \quad (3)$$

Множество точек, связанные зависимостью (1), образуют сердцевидную кривую, которую называют ударной полярой. Ударная поляра обычно строится в координатах $\{\Lambda = \ln J, \beta\}$.

Определение типа интерференции и расчет интенсивности отраженных разрывов заключается в анализе каскада таких поляр (рис. 2).

Первый скачок уплотнения σ_1 является точкой на ударной поляре, построенной по числу Маха M невозмущенного потока, называемой основной полярой. Из этой точки исходит поляра, называемая вторичной, с числом Маха M_1 за первым скачком, используя формулу (2). Последняя, третичная поляра, строится из точки соответствующей второму скачку σ_2 , которая, находится на вторичной поляре. Число Маха M_2 третичной поляры определяется из подстановки J_2 и M_1 в (2). Третичная поляра соответствует всем возможным скачкам уплотнения, которые могут быть за первыми двумя скачками.

Пересечение этих поляр соответствует возможным ударно-волновым конфигурациям. Так, например, пересечение третичной поляры с первой (рис. 2, точка № 1) приводит к таким параметрам главного скачка σ_3 и отраженного разрыва R , при которых соблюдается равенство углов отклонения потока по обе стороны тангенциального разрыва τ . Математически это условие можно записать как уравнение:

$$\beta(M, J_3) = \beta(M, J_1) + \beta(M_1, J_2) - \beta\left(M_2, \frac{J_3}{J_1 J_2}\right). \quad (4)$$

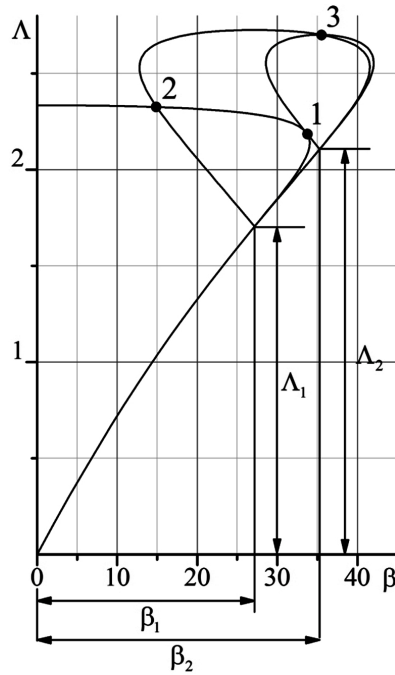


Рисунок 2 – Ударные поляры, соответствующие интерференции догоняющих скачков уплотнения

Эта конфигурация соответствует регулярной интерференции показанной на рисунке 1, б. Нерегулярная интерференция происходит в том случае, когда пересечение между третичной и основной полярой отсутствует. В таком случае может образовываться множество различных структур на основании расположения точек 2 и 3. В данной статье будет рассматриваться только тот случай, когда интенсивность точки № 2 (рис. 2) превышает ту интенсивность, которая замедляет поток до $M < 1$ относительно потока за первым скачком. Такая конфигурация показана на рисунке 3.

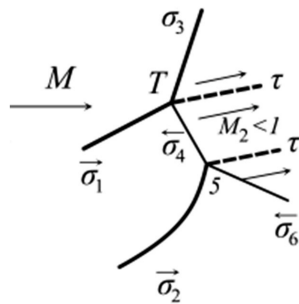


Рисунок 3 – Нерегулярная интерференция:

M – число Маха; T – точка пересечения скачков уплотнения; σ_1, σ_2 – догоняющие скачки уплотнения; σ_3 – главный скачок уплотнения; τ – тангенциальный разрыв; σ_4 – ножка Маха, стрелками показаны линии тока, левая \leftarrow или правая \rightarrow стрелка над обозначением газодинамического разрыва означает, соответственно, левое или правое направление этого разрыва

Параметры скачка 3 и 4 определяется точкой № 2 на рисунке 2. Параметры скачка 3 определяются относительно начала координат. Скачок 4 определяется относительно точки первого скачка уплотнения. Параметры скачка 6 определяются точкой № 3 на том же рисунке относительно точки второго скачка уплотнения.

Анализ результатов

Скачки уплотнения задавались углом преломления потока $\beta_1 = 20^\circ, \beta_2 = 10^\circ$. Расчет производился для показателя адиабаты 1.4. Совместно с расчетом на полярах проводилось аналогичное моделирование методом конечных разностей. Расчетная полость показана на рисунке 4. На левой границе полости задается равномерное распределение чи-

сел Маха, в результате на клинья натекает сверхзвуковой поток с заданным числом M , который варьируется квазистационарно, то есть соответствует бесконечно медленному изменению числа Маха. На рисунке 5 показан вид течения при различных числах Маха.

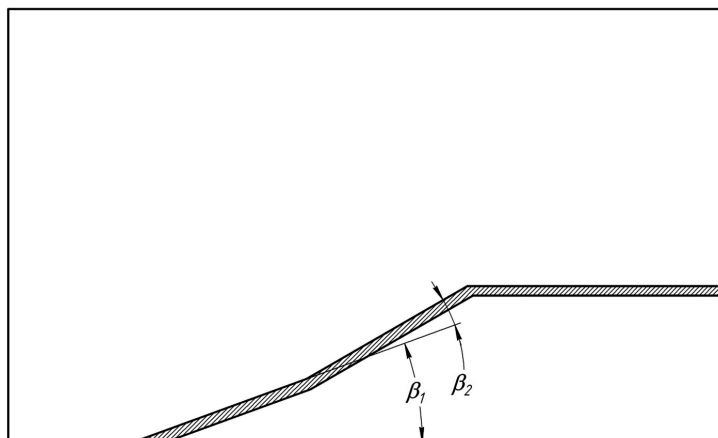


Рисунок 4 – Расчетная модель

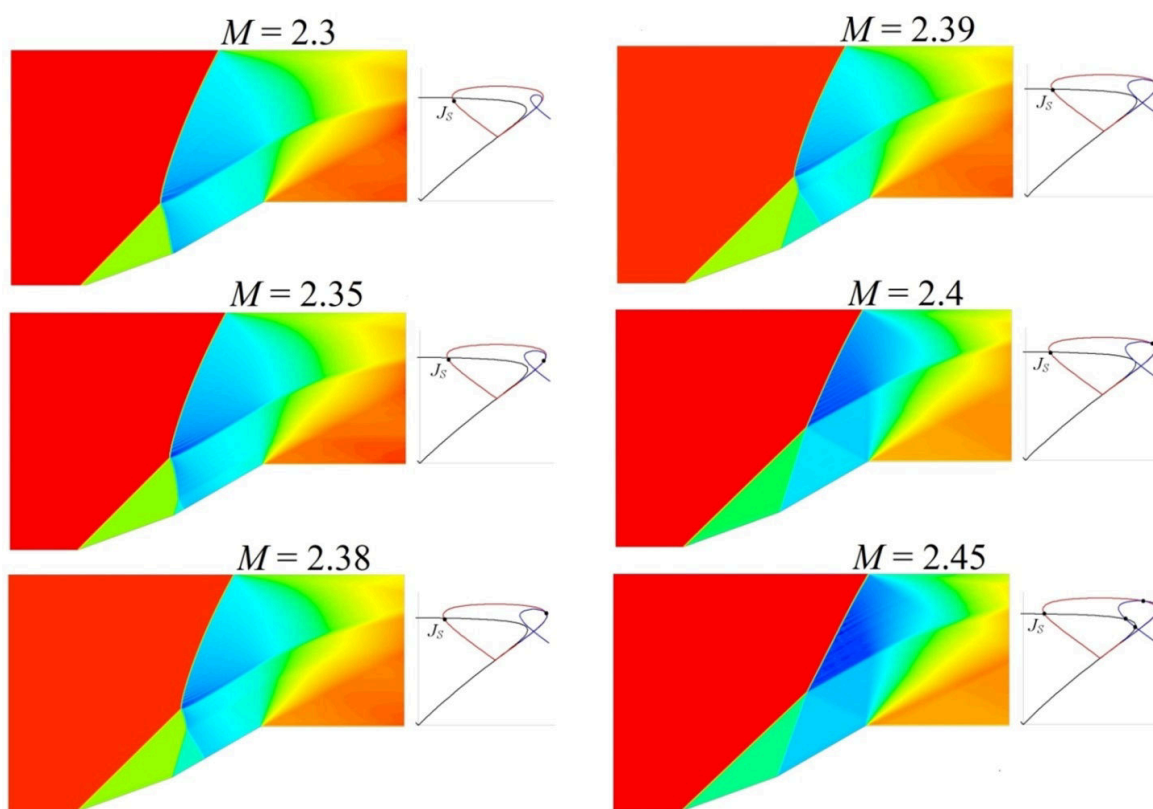


Рисунок 5 – Вид течения при численном моделировании и построенные по параметрам ударные поляры. Цвет соответствует скорости потока в данной точке

При числах Маха ниже 2,35 второй скачок является отошедшим скачком, не имеется отраженных разрывов вдоль потока, за отошедшим скачком дозвуковая скорость. Уменьшение числа Маха отодвигает отошедшую волну в направлении против потока. По анализу поляр эта область делится на две. Первая область определяется как та, где не существует такого скачка уплотнения, что может развернуть поток на угол β_2 (для данной задачи эта область при $M < 2,24$). Во второй области скачок может развернуть поток на заданный угол, но у третичной поляры нет пересечения ни с вторичной, ни с основной полярой (для данной задачи эта область при $2,24 < M < 2,325$).

Нерегулярная интерференция образуется при касании третичной поляры со второй. Её конфигурация наблюдается в численном расчете при числах Маха от 2,32 до 2,4.

Переход из нерегулярной интерференции в регулярную происходит при касании третичной поляры с основной. Расчет, основанный на полярах, выдает переход при числе Маха 2,402. По моделированию методом конечных разностей переход был отмечен в промежутке между 2,39 и 2,4 числами Маха.

Заключение

В данной статье был показан принцип расчета нерегулярной интерференции при дозвуковой скорости за главным скачком, и регулярной интерференции при отраженном разрыве как скачок уплотнения. Были показаны основные причины перестроек из одного типа отражения в другое. Проведено сравнение анализа на полярах с численным моделированием.

Сравнение показало хорошую корреляцию расчета с теоретическим анализом. Интерес представляет случай в промежутке от 2,24 до 2,325 чисел Маха для данной задачи. Параметры дают возможность присутствия присоединенного к клину скачка уплотнения, но не позволяет создать интерференцию между приходящими скачками. Последующие работы будут сконцентрированы на следующих вопросах: всегда ли это ведет к отошедшему скачку уплотнения? Каким образом связана интерференция скачков уплотнения и образование скачка на клине?

Литература:

1. Булат П.В. Интерференция скачков уплотнения одного направления / П.В. Булат, П.В. Денисенко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15. – № 3. – С. 500–508.
2. Веккен В.К. Предельные положения вилкообразных скачков уплотнения / В.К. Веккен // Механика. – 1950. – № 4. – С. 131–143.
3. Росляков Г.С. Взаимодействие плоских скачков уплотнения одного направления / Г.С. Росляков // Численные методы в газовой динамике. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1965. – С. 28–51.
4. Росляков Г.С. Интерференция стационарных скачков уплотнения одного направления / Г.С. Росляков, А.Л. Старых, В.Н. Усков // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1987. – № 4. – 143–52 С.
5. Bulat P.V. Shock and detonation wave in terms of view of the theory of interaction gasydynamic discontinuities / P.V. Bulat, V.N. Uskov // Life Science Journal. – 2014 – 11, 8s – 307–10 P. – URL : http://www.lifesciencesite.com/ljsj/life1108s/068_24921life1108s14_307_310.pdf
6. Bulat P.V. Gas-dynamic discontinuity conception / P.V. Bulat, V.N. Uskov, L.P. Arkhipova // Research Journal of Applied Sciences. – 2014 – 8, 22. – 2255–59 P. – URL : <http://www.maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2255-2259.pdf>
7. Bulat P.V. Classification of gas-dynamic discontinuities and their interference problems / P.V. Bulat, V.N. Uskov, L.P. Arkhipova // Research Journal of Applied Sciences. – 2014. – 8, 22 – 2248–54 P. – URL : <http://maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2248-2254.pdf>
8. Bulat P.V. Mach reflection of a shock wave from the symmetry axis of the supersonic nonisobaric jet / P.V. Bulat, V.N. Uskov // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2014. – 8, 1. – 135–42 P. – URL : <http://maxwellsci.com/print/rjaset/v8-135-142.pdf>
9. Булат П.В. Отражение косоугольного скачка уплотнения от стенки / П.В. Булат, В.В. Упырев, П.В. Денисенко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15. – № 2. – 338–45 С. – URL : http://ntv.ifmo.ru/ru/journal/617/journal_617.htm
10. Булат П.В. Интерференция встречных скачков уплотнения / П.В. Булат, П.В. Денисенко, Н.В. Продан // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15. – № 2. – 346–55 С. – URL : http://ntv.ifmo.ru/ru/journal/617/journal_617.htm

References:

1. Bulat P.V. Interferention's of jumps of consolidation of one direction / P.V. Bulat, P.V. Denisenko // Scientific and technical messenger of information technologies, mechanics and optics. – 2015. – V. 15. – № 3. – P. 500–508.
2. Vekken V.K. Limit provisions of forked jumps of consolidation / V.K. Vekken // Mechanics. – 1950. – № 4. – P. 131–143.
3. Roslyakov G.S. Interaction of flat jumps of consolidation of one direction / G.S. Roslyakov // Numerical methods in gas dynamics. – М. : Mosk. publishing house. Un., 1965. – P. 28–51.

4. Roslyakov G.S. Interference of stationary jumps of consolidation of one direction / G.S. Roslyakov, A.L. Starykh, V.N. Uskov // *Izv. Academy of Sciences of the USSR. MZhG.* – 1987. – № 4. – 143-52 P.
5. Bulat P.V. Shock and detonation wave in terms of view of the theory of interaction gasdynamic discontinuities / P.V. Bulat, V.N. Uskov // *Life Science Journal.* – 2014 – 11, 8s – 307–10 P. – URL : http://www.lifesciencesite.com/ljsj/life1108s/068_24921life1108s14_307_310.pdf
6. Bulat P.V. Gas-dynamic discontinuity conception / P.V. Bulat, V.N. Uskov, L.P. Arkhipova // *Research Journal of Applied Sciences.* – 2014 – 8, 22. – 2255–59 P. – URL : <http://www.maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2255-2259.pdf>
7. Bulat P.V. Classification of gas-dynamic discontinuities and their interference problems / P.V. Bulat, V.N. Uskov, L.P. Arkhipova // *Research Journal of Applied Sciences.* – 2014. – 8, 22 – 2248–54 P. – URL : <http://maxwellsci.com/print/rjaset/v8-2248-2254.pdf>
8. Bulat P.V. Mach reflection of a shock wave from the symmetry axis of the supersonic nonisobaric jet / P.V. Bulat, V.N. Uskov // *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology.* – 2014. – 8, 1. – 135–42 P. – URL : <http://maxwellsci.com/print/rjaset/v8-135-142.pdf>
9. Bulat P.V. Reflection of slanting jump of consolidation from a wall / P.V. Bulat, V.V. Upyrev, P.V. Denisenko // *Scientific technical messenger information technologies, mechanics and optics.* – 2015. – V. 15. – № 2. – 338–45 P. – URL : http://ntv.ifmo.ru/ru/journal/617/journal_617.htm
10. Bulat P.V. Interferention's of counter jumps of consolidation / P.V. Bulat, P.V. Denisenko, N.V. Prodan // *Scientific technical messenger information technologies, mechanics and optics.* – 2015. – V. 15. – № 2. – 346–55 P. – URL : http://ntv.ifmo.ru/ru/journal/617/journal_617.htm